

ANTONIO DE PADUA MENDONÇA FRAGASSI

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM  
APLICATIVO PARA EXTRAÇÃO DE FEIÇÕES  
ARQUITETÔNICAS SOBRE IMAGENS DIGITAIS**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
à obtenção do grau de Mestre em Ciências  
no Curso de Pós-Graduação em Ciências  
Geodésicas, da Universidade Federal do  
Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Quintino Dalmolin

Co-orientadores: Profs. MSc. Carlos Antonio O. Vieira  
e Vladimir Oliveira Di Iorio

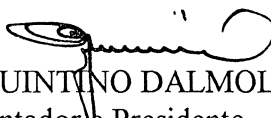
CURITIBA  
1998

# **"DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM APLICATIVO PARA EXTRAÇÃO DE FEIÇÕES ARQUITETÔNICAS SOBRE IMAGENS DIGITAIS"**

**POR**

**ANTONIO DE PÁDUA MENDONÇA FRAGASSI**

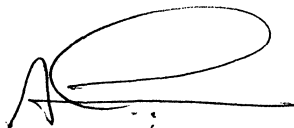
Dissertação aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



Prof. Dr. QUINTINO DALMOLIN –  
Orientador e Presidente



Prof. Dr. EDSON APARECIDO MITISHITA - Membro



Prof. Dr. ALUIR PORFÍRIO DAL POZ - Membro



## **DEDICATÓRIA**

**A Deus**

**Aos meus pais**

**Amedeo e Dinalva**

**A minha esposa Lola**

**A todos os meus irmãos**

## AGRADECIMENTOS

O autor externa seus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas e instituições :

- Ao Prof. Dr. Quintino Dalmolin, da UFPR, pelo apoio e orientação indispensáveis ao desenvolvimento desta dissertação;
- Aos Professores Carlos Antonio Oliveira Vieira, do Departamento de Engenharia Civil da UFV e Vladimir Oliveira Di Iorio, do Departamento de Informática da UFV, pelo apoio e co-orientação indispensáveis ao desenvolvimento desta dissertação;
- Ao Professores Ricardo Seixas Brites, Carlos Antônio Álvares Ribeiro e Vicente Paulo Soares do Departamento de Engenharia Florestal da UFV, pelo acompanhamento e sugestões;
- Aos amigos e acadêmicos Wanderley, André, Marcos, Vagner, Dalva e Delson que participaram em várias etapas deste processo;
- Ao CNPq , pela bolsa de estudos concedida durante o período de realização do curso;
- Ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFV, na figura do Prof. Paulo Tadeu Arantes, que incentivou e acompanhou todo o processo;
- A todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>xvi</b>
<b>LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xix</b>
<b>1.0 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2 A PROPOSTA DO TRABALHO .....	2
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	2
<b>2.0 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
2.1 PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS .....	3
2.1.1 Técnicas de pré-processamento .....	5
2.1.1.1 <i>Correção Radiométrica</i> .....	6
2.1.1.2 <i>Correção Geométrica</i> .....	8
2.1.2 Técnicas de realce.....	8
2.1.2.1 <i>Manipulação de Contraste</i> .....	8
2.1.2.1.1 Aumento de Contraste Linear .....	10
2.1.2.1.2 Aumento de Contraste Linear Saturado .....	12
2.1.2.1.3 Equalização de Histograma .....	12
2.1.2.1.4 Limiar de Nível de Cinza.....	17
2.1.2.2 <i>Filtragem Espacial</i> .....	18
2.1.2.2.1 Filtros Passa Baixas.....	21
2.1.2.2.2 Filtros Passa Altas .....	24
2.2 FOTOGRAMETRIA TERRESTRE .....	30
2.2.1 Sistemas Fotogramétricos .....	33
2.2.1.1 <i>Aquisição de Dados</i> .....	33

2.2.1.2 Redução de dados .....	35
2.2.2. Problemas na aquisição de dados .....	38
2.2.2.1. Comparadores .....	38
2.2.2.2 Deformação da imagem .....	39
2.2.2.2.1. Refração atmosférica .....	40
2.2.2.2.2. Trabalho do Filme .....	40
2.2.2.2.3 Distorções das Lentes .....	41
2.2.3 Técnicas Empregadas na Redução dos Dados em Fotogrametria a Curta Distância .....	49
2.2.3.1 Estereofotogrametria .....	49
2.2.3.2 Fotogrametria Bidimensional .....	49
2.2.3.3 Retificação Simples .....	50
2.2.3.4 Retificação Diferencial .....	50
2.2.3.5 Monorestituição .....	51
2.3 - MÉTODOS PARA RETIFICAÇÃO DIGITAL E MONORESTITUIÇÃO .....	53
2.3.1 Método direto .....	54
2.3.2 Método indireto .....	55
2.3.3 Reamostragem ou interpolação de tom de cinza .....	56
2.3.4 Transformações geométricas .....	60
2.3.4.1 Transformação Afim no Plano .....	61
2.3.4.2 Transformação Projetiva no Plano .....	62
2.3.4.3 Equação de Colinearidade Parametrizada .....	63
2.3.4.4 Equação da DLT .....	65
2.3.5 Cálculo dos parâmetros pelo MMQ .....	68
2.3.5.1 Transformação afim .....	73
2.3.5.2 Equação de colinearidade .....	76
2.3.5.3 Equação da DLT .....	81
2.3.5.4 Equação projetiva .....	82
2.3.6 Análise da precisão .....	84
2.3.7 Determinação da grade regular da ortoimagem .....	86
2.3.8 Mapeamento inverso para as equações implementadas .....	89
<b>3.0 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>93</b>

3.1 MATERIAIS EMPREGADOS .....	93
3.1.1 Imagem hipotética .....	93
3.1.2 Fotografias .....	94
3.1.2.1 <i>Preparo do controle</i> .....	94
3.1.2.1.1 Confecção dos Alvos .....	95
3.1.2.1.2 Levantamentos dos Pontos .....	96
3.1.2.1.3 Tomada das Fotografias .....	99
3.2 METODOLOGIA .....	100
3.2.1 Entrada de dados .....	101
3.2.2 Coleta de pontos .....	101
3.2.3 Cálculo dos parâmetros das equações implementadas .....	101
3.2.4 Informações sobre o ajustamento .....	102
3.2.5 Retificação .....	102
3.2.6 Extração das feições .....	108
3.2.7 Exportação dxf .....	112
3.3 DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO PROPOSTO .....	114
3.3.1 Entrada de dados .....	115
3.3.2 Manipulação dos dados .....	118
3.3.2.1 <i>Pré-Processamento</i> .....	118
3.3.2.2 <i>Processamento</i> .....	124
3.3.2.2.1 Execução da Retificação no SIFAR 1.0 .....	125
3.3.2.2.2 Retirada de feição no SIFAR 1.0 .....	131
3.3.3 Saída dos dados .....	136
<b>4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>142</b>
4.1 AVALIAÇÃO DA PRECISÃO .....	142
4.2 AVALIAÇÃO DA IMAGEM HIPOTÉTICA .....	147
4.3 AVALIAÇÃO DAS FOTOS SELECIONADAS .....	153
4.3.1 Avaliação da foto 1 .....	154
4.3.2 Avaliação da foto 2 .....	157
4.3.3 Avaliação da foto 3 .....	161
4.3.4 Avaliação da foto 4 .....	164
4.3.5 Avaliação da foto 5 .....	168

4.4 GERAÇÃO DE ARQUIVO DXF DAS FEIÇÕES RETIRADAS.....	172
4.5 AVALIAÇÃO DA RETIFICAÇÃO.....	173
4.5.1 Avaliação da imagem hipotética.....	174
4.5.2 Avaliação da foto 5 .....	177
<b>5.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>181</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	181
5.2 CONCLUSÕES .....	181
5.3 RECOMENDAÇÕES .....	183
<b>ANEXOS 1 - ARQUIVO TIPO AUX.....</b>	<b>185</b>
<b>ANEXOS 2 - ARQUIVO TIPO PRJ .....</b>	<b>186</b>
<b>ANEXOS 3 - IMAGENS UTILIZADAS.....</b>	<b>188</b>
<b>ANEXOS 4 - COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO .....</b>	<b>191</b>
<b>ANEXOS 5 – DADOS PARA AVALIAÇÃO DA IMAGEM HIPOTÉTICA .....</b>	<b>192</b>
<b>ANEXOS 6 – DADOS PARA AVALIAÇÃO DA FOTO 1 .....</b>	<b>196</b>
<b>ANEXOS 7– DADOS PARA AVALIAÇÃO DA FOTO 2 .....</b>	<b>198</b>
<b>ANEXOS 8– DADOS PARA AVALIAÇÃO DA FOTO 3 .....</b>	<b>200</b>
<b>ANEXOS 9– DADOS PARA AVALIAÇÃO DA FOTO 4 .....</b>	<b>202</b>
<b>ANEXOS 10– DADOS PARA AVALIAÇÃO DA FOTO 5 .....</b>	<b>204</b>
<b>ANEXOS 11– ARQUIVO DXF DAS ENTIDADES EXTRAIDAS .....</b>	<b>206</b>
<b>ANEXOS 12– DADOS DA IMAGEM HIPOTÉTICA.....</b>	<b>207</b>
<b>ANEXOS 13– RELATÓRIO DO SIFAR1.0.....</b>	<b>208</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>216</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 : Correção radiométrica dos dados .....	6
FIGURA 2 : Representação gráfica da função de transferência.....	10
FIGURA 3 : Representação gráfica de uma reta passando por dois pontos .....	11
FIGURA 4 : Aumento de contraste com saturação .....	12
FIGURA 5 : Aumento de contraste por equalização .....	13
FIGURA 6 : Histograma de uma imagem hipotética a ser equalizada .....	14
FIGURA 7 : Histograma da imagem hipotética equalizada.....	17
FIGURA 8 : Uma operação de limiar sobre uma imagem. a) imagem original; b) imagem processada.....	18
FIGURA 9 : Variações de VB ao longo de uma linha de uma imagem (a) sendo expressas por varias componentes senoidais (b) com diferentes amplitudes e frequências. ....	19
FIGURA 10 : Visualização de uma máscara (b) passando sobre uma imagem (a).....	20
FIGURA 11 : um sistema de formação de imagem .....	26
FIGURA 12: Componentes da distorção radial.....	43
FIGURA 13 : Variação da distorção radial em função da distância objeto-câmara.....	45
FIGURA 14 : Variação da distorção radial em função da variação do ponto dentro do campo de profundidade .....	46
FIGURA 15 : Parâmetros que determinam o valor da distorção descentrada de lentes. ....	47
FIGURA 16 :Princípio de colinearidade.....	52

FIGURA 17 : Representação do mapeamento entre uma imagem de entrada e saída.....	54
FIGURA 18 : Mapeamento direto. ....	55
FIGURA 19 : Mapeamento indireto. ....	55
FIGURA 20 : Representação do mapeamento indireto. ....	56
FIGURA 21 : (a) quadrilátero (ABCD) no espaço objeto e (b) quadrilátero (A'B'C'D') no espaço imagem.....	88
FIGURA 22 : Mapeamento inverso.....	89
FIGURA 23 : Princípio da produção de ortofoto digital usando o método indireto. ....	91
FIGURA 24 :Imagem gerada para teste.....	93
FIGURA 25 :Representação esquemática dos alvos utilizados.....	95
FIGURA 26 :Obtenção das coordenadas de um ponto por interseção a vante. ....	96
FIGURA 27 :Representação esquemática em planta e elevação dos alvos sobre o prédio levantado. ....	98
FIGURA 28 : Representação esquemática do efeito de perspectiva sobre as fotografias utilizadas.....	100
FIGURA 29 : Passo 1 da retificação digital usando a transformação afim ou projetiva .....	103
FIGURA 30 : Passo 2 da retificação digital usando a transformação afim ou projetiva .....	104
FIGURA 31 : Passo 1 da retificação digital usando a equação de colinearidade.....	104
FIGURA 32 : Passo 2 da retificação digital usando a equação de colinearidade.....	105
FIGURA 33 : Passo 3 da retificação digital usando a equação de colinearidade.....	105
FIGURA 34 : Passo 4 da retificação digital usando a equação de colinearidade.....	106
FIGURA 35 : Passo 3 da retificação digital usando a equação a DLT .....	106



FIGURA 36 : Passo 1 da monorestituição digital usando a transformação afim ou projetiva .....	109
FIGURA 37 : Passo 2 da monorestituição digital usando a transformação afim ou projetiva .....	109
FIGURA 38 : Passo 1 da monorestituição digital usando a equação de colinearidade.....	110
FIGURA 39 : Passo 3 da monorestituição digital usando a equação de colinearidade.....	111
FIGURA 40 : Tela principal do SIFAR1.0 mostrando a opção <i>Abrir Projeto</i> . ....	116
FIGURA 41 : Caixa de diálogo da opção <i>Abrir Projeto</i> . ....	116
FIGURA 42 : Janela principal do SIFAR1.0 mostrando a Barra de Ferramenta e o Botão de atalho para a opção <i>Abrir Projeto</i> . ....	117
FIGURA 43 : Janela de informações do projeto a ser criado pela opção <i>Criar Projeto</i> . ....	117
FIGURA 44 : A opção Eliminar Ruído no SIFAR1.0.....	119
FIGURA 45 : Opção <i>Filtragem</i> mostrando os filtros disponíveis. ....	120
FIGURA 46 : Janela para visualização do efeito do processamento escolhido. ....	120
FIGURA 47 : Janela para a opção <i>Definir</i> . ....	121
FIGURA 48 : Visualização da opção <i>Realce</i> . ....	122
FIGURA 49 : Entrada da percentagem total de saturação. ....	122
FIGURA 50 : Janela da opção <i>Bordas</i> com direção Sul em destaque e filtro de Sobel escolhido. ....	123
FIGURA 51 : Janela da opção <i>Limiar</i> . ....	123
FIGURA 52 : Janela para entrada de dados na opção <i>Criar projeto</i> . ....	129
FIGURA 53 : Janela da opção <i>Retificação Simples</i> . ....	129

FIGURA 54 : Janela da opção Retificação Simples.....	130
FIGURA 55 : Janela de auxílio de zoom na retirada de Pontos de controle . ....	130
FIGURA 56 : Botões de atalho para imprimir ou visualizar impressão na barra de ferramentas .....	130
FIGURA 57 : Janela de visualização de impressão do SIFAR 1.0 .....	131
FIGURA 58 : Janela para verificar a estatística do ajustamento.....	132
FIGURA 59 : Caixa de ferramentas para desenho .....	133
FIGURA 60 : Janela de criação de níveis de informações. ....	134
FIGURA 61 : Janela de seleção dos níveis a serem escondidos. ....	135
FIGURA 62 : Caixa de seleção dos níveis de inserção dos objetos. ....	135
FIGURA 63 : Janela para edição dos níveis. ....	136
FIGURA 64 : Comportamento do EMQ (PT) para cada teste.....	143
FIGURA 65 : Comportamento do EMQ (PC) para cada teste.....	144
FIGURA 66 : Comportamento do ERP para cada teste .....	144
FIGURA 67 : Comportamento do EV médio para cada teste.....	145
FIGURA 68 : Visualização do arquivo DXF gerado aberto no AutoCAD.14. ....	172
FIGURA 69 : Ortorectificação da imagem hipotética.....	174
FIGURA 70 : Medidas entre os pontos obtidas no AutoCAD.....	175
FIGURA 71 : Posição dos eixos em cada situação. ....	177
FIGURA 72 : Medidas entre os pontos obtidas no AutoCAD para situação 1.....	178
FIGURA 73 : Medidas entre os pontos obtidas no AutoCAD para situação 2.....	179

FIGURA 74 : Imagem original.....	179
FIGURA 75 Imagem retificada após rotação do sistema .....	180

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 : Estatística para uma imagem hipotética.....	15
TABELA 2 : Valores da probabilidade acumulativa.....	15
TABELA 3 : Identificação dos níveis de cinza mais próximos .....	16
TABELA 4 : Estatística da imagem hipotética equalizada.....	16
TABELA 5 : Interpolação pelo vizinho mais próximo para a posição (2,20 ;2,18) .....	57
TABELA 6 : Interpolação bilinear para a posição (2,20 ;2,18) .....	58
TABELA 7 : Convolução cúbica para a posição (2,20 ;2,18) .....	60
TABELA 8 : Testes para a escolha da configuração ideal para a equação afim.....	143
TABELA 9 : Resultados dos testes aplicados sobre a DLT .....	145
TABELA 10 : Resultados obtidos via equação projetiva fazendo-se uso de dois procedimentos distintos. ....	146
TABELA 11 : Resultados obtidos para a foto hipotética usando a metodologia proposta ....	148
TABELA 12 : Resultados obtidos para a foto hipotética fixando pontos .....	150
TABELA 13 : : Resultados obtidos para a foto 1 usando a metodologia proposta.....	154
TABELA 14 : : Resultados obtidos para a foto 1 fixando pontos.....	155
TABELA 15 : Resultados obtidos para a foto 2 usando a metodologia proposta.....	158
TABELA 16 : Resultados obtidos para a foto 2 fixando pontos.....	159
TABELA 17 : Resultados obtidos para a foto 3 usando a metodologia proposta.....	161
TABELA 18 : Resultados obtidos para a foto 3 fixando pontos.....	162

TABELA 19 : Resultados obtidos para a foto 4 usando a metodologia proposta.....	165
TABELA 20 : Resultados obtidos para a foto 4 fixando pontos.....	166
TABELA 21 : Resultados obtidos para a foto 5 usando a metodologia proposta.....	168
TABELA 22 : Resultados obtidos para a foto 5 fixando pontos.....	170
TABELA 23 : Estatística para a imagem retificada .....	176
TABELA 24: Análise da ortoimagem .....	180

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 : Comparação entre a sequência de tratamento convencional e DLT .....	68
QUADRO 2 : Esquematização do fluxo de dados no SIFAR1.0.....	115
QUADRO 3 : Visualização do fluxo de dados no SIFAR1.0.....	124
QUADRO 4 : valores dos códigos do arquivo AUX.....	127
QUADRO 5 : valores dos códigos do arquivo AUX.....	128
QUADRO 6 : Descrição das ferramentas de desenho em (1).....	133
QUADRO 7 : Descrição das ferramentas em (2).....	134
QUADRO 8 : Valores de E.....	138
QUADRO 9 : Valores de e .....	138
QUADRO 10 : Valores de t .....	139
QUADRO 11: Valores de h .....	139
QUADRO 12 : Esquema de XXXXXXXX.....	140

## LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS

$E( )$	operador esperança
$X$	vetor dos parâmetros desconhecidos
$\hat{X}$	vetor dos parâmetros estimados
$F(X)$	Função das observações
$L_b$	vetor das observações
$L_a$	vetor das observações ajustadas
$A$	matriz de coeficientes $A = \frac{\partial F(X)}{\partial X}$
$V$	vetor resíduo ( $L_a - L_b$ )
$\sigma_i$	desvio padrão da i-ésima observação
$\sigma_o^2$	fator de variância <i>a priori</i>
$\hat{\sigma}_o^2$	fator de variância <i>a posteriori</i>
$\Sigma_{Lb}$	matriz variância-covariância das observações
$Q$	matriz cofatora das observações
$P$	matriz dos pesos das observações
$n$	número de observações
$u$	número de parâmetros desconhecidos (incógnitas)
$r$	número de graus de liberdade = $n - u$
$VB$	valor de brilho
$VN$	valor numérico
$C$	contraste
$f( )$	frequência
$P( )$	probabilidade
$\Delta$	Divergente
$\Delta^2$	Laplaciano
$\delta_r^D$	Componente radial da distorção descentrada
$\delta_t^D$	Componente radial da distorção descentrada
EMQ(geral)	Erro médio quadrático utilizando todos os pontos observados
EMQ(PT)	Erro médio quadrático utilizando os pontos usados no ajustamento
EMQ(PC)	Erro médio quadrático utilizando os pontos de checagem
NPT	Número de pontos utilizados no ajustamento
NPC	Número de pontos de checagem
GL	Grau de liberdade
EV médio	Erro verdadeiro médio = $EV/nd$ ; com $nd$ = número de distâncias observadas
EV	Erro verdadeiro
ER	Erro relativo
ERP	Erro relativo percentual
$S^2$	Variância

## RESUMO

Nesta dissertação são tratados e implementados os métodos, recursos e procedimentos necessários para desenvolver um aplicativo a baixo custo para trabalhar com fotogrametria a curta distância voltada para a arquitetura. Para tal fim, foram feitas as seguintes implementações : tratamento de imagem, monorestituição e retificação de imagens. O aplicativo, denominado SIFAR1.0, tem como objetivo básico a redução de dados, quer seja por vetorização das feições ou por geração de ortoimagens, provenientes da digitalização de fotos de monumentos históricos, para fins de documentação. Para testar a aplicabilidade do SIFAR1.0 foram efetuados testes com fotografias de um edifício, onde foram afixados e levantados alvos, necessários para ligar os sistemas imagem-objeto. Os resultados, utilizando-se das equações implementadas, mostraram-se, na sua melhor opção, compatíveis com a escala 1:50, para a vetorização, e 1:100 para a ortoimagem. Percebeu-se que o aplicativo não era limitado apenas a fotos de fachadas e que o mesmo tinha potencial para trabalhar com imagens aéreas. Assim, foram realizados testes com uma imagem hipotética, gerada a partir da equação de colinearidade onde os parâmetros exteriores e interiores foram fixados. Os resultados mostraram que o SIFAR1.0, permitiu a vetorização e a geração de ortoimagem compatíveis com a escala de 1:1000.



## ABSTRACT

In this thesis are presented and implemented methods, resources and procedures needed to develop a low cost software to work with close range photogrammetry related to architecture. To do this, it was implemented procedures for image processing, like enhancement, thresholding, etc, as well as it was treated and also improved some mathematic models to make the extraction of features on digital images. The procedures to make the rectification of images are also in this software. It is denominated SIFAR1.0, and its basic objective is the data reduction by extraction of features or orthoimage generation, come from digitalization of historical monuments pictures, for documentation ends. To test the applicability of SIFAR1.0 tests were done in a building pictures, where targets, needed to link the systems of image and object, were fixed and surveyed. The results, using, implemented equations, shown themselves, in their best option, compatible with 1:50 scale, for extraction of features, and 1:100 scale for orthoimage. It was noted that the software was not limited for façades pictures and it had potential to work with aerial pictures. Then, tests were done with a hypothetical image, generated by the collinearity equation where the external and internal parameters were fixed. The results shown that SIFAR1.0 allowed the extraction of features and generation of orthoimage compatible with 1:100 scale.

## 1.0 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A memória de um povo e consequentemente de uma época se preserva nos monumentos e sítios que este constrói. As intempéries, às quais tais monumentos e sítios estão sujeitos, tendem a apagar a história deste povo, e naturalmente aniquilar a sua memória. Assim, faz-se necessário registrar os monumentos e sítios históricos para que a própria história não se perca. Desta forma, a VIII Assembléia Geral do Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (ICOMOS) aprovou, em 1987, a resolução do Comitê Internacional de Fotogrametria Arquitetônica (CIPA) que diz respeito a arquivos fotogramétricos. A documentação científica e registro por meio de arquivos fotogramétricos constitui uma ferramenta muito promissora, quando se une a estes os recursos da Fotogrametria Terrestre, para preservar as heranças arquitetônicas e arqueológicas para a posteridade (GOMES et al., 1995; CARBONNELL, 1989; OGLEBY, 1995). A fotogrametria representa a forma mais avançada de documentação arquitetural sob o ponto de vista científico, técnico e econômico, e o seu desenvolvimento neste campo deve ser considerado como um objetivo de extensão universal. A fim de permitir o uso desta tecnologia, sofisticados procedimentos e instrumentos fotogramétricos têm sido desenvolvidos (FERREIRA apud MENDONÇA, 1995; PATIAS e ROSSIKOPOULOS, 1992). Dentro desta linha de raciocínio vários aplicativos foram criados para documentar e registrar fotograficamente os monumentos históricos. Pode-se encontrar no mercado aplicativos a preços e desempenho variados, sendo que os aplicativos de alto custo, apesar de apresentarem uma melhor performance, são inacessíveis economicamente aos usuários. Dependendo da natureza e destino dos trabalhos, o requerimento de alta precisão não é exigido, permitindo ao usuário optar por aplicativos menos complexos e de baixo custo. Dentre os aplicativos disponíveis no mercado, variando em grau de refinamento e custo, pode-se citar : Elcovision 10, Rolleimetric MR2, PhoX, Fotomass, ARCHIS, ASTRI, FotoCAD, PHIDIAS, ORTHOMAP, SNAP, Foto 3D, Alpha 2000, ASP 2000, DVP, etc. (FELLBAUM, 1992; PALLASKE, MARTEN e MAUELSHAGEN, 1994; Astori B. et al., 1992; GEORGOPOULOS, 1992; PHILIPS, 1995; KNOBLOCH e ROSENTHAL, 1992; MÜFTÜOĞLU e ÖRMECI, 1992).

## 1.2 A PROPOSTA DO TRABALHO

Neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um aplicativo de baixo custo para extrair feições arquitetônicas, via monorestituição, na tela do computador sobre imagens digitais ou digitalizadas. Tal programa permitirá ao usuário vetorizar as feições de seu interesse bem como gerar ortoimagens e será testado para verificar a precisão com que são obtidos os resultados e se estes atendem aos requisitos da arquitetura para fins de documentação e restauro.

O aplicativo permitirá ainda a identificação de pontos de controle sobre a imagem por meio do *mouse* e de ferramentas de *zoom*. Com o auxílio de ferramentas de desenho apropriadas, o usuário poderá contornar as feições de seu interesse e armazená-las em níveis de informações, as quais serão posteriormente transformadas por meio do uso de modelos matemáticos específicos para gerar arquivos DXF. O programa permitirá ainda o tratamento de imagem como, realce, limiar e filtragem com visualização na tela do monitor ou impressora.

## 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O aplicativo deve permitir :

- monorestituição;
- geração de ortoimagens;
- retificação;
- realce;
- filtragem;
- limiarização;
- extração de feições;
- geração de arquivos DXF; e
- Avaliar as técnicas implementadas

## 2.0 REVISÃO DE LITERATURA

O capítulo 2 aborda a revisão de literatura, aí estão incluídos os estudo das técnicas de tratamento de imagens implementadas no aplicativo; uma revisão bibliográfica da Fotogrametria Terrestre com ênfase na sua aplicação para a arquitetura, especificamente para levantamentos de sítios e monumentos históricos; o sistema fotogramétrico geral, ou seja, a aquisição e a redução de dados; uma abordagem dos problemas na aquisição de dados; e as técnicas empregadas na redução de dados em fotogrametria terrestre. Ainda neste capítulo é tratado com mais profundidade os modelos matemáticos para efetuar a monorestituição e a retificação digital.

### 2.1 PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

Processamento digital de imagem é a manipulação numérica de imagens digitais e incluem o pré-processamento, realce e classificação (SCHOWENGERDT, 1983; NOVO, 1992; CRÓSTA, 1992 e SABINS, 1987). Entretanto, LILLESAND e KIEFER (1987) dividem o processamento digital de imagem em quatro partes: retificação e restauração, realce, classificação e fusão de dados (*data merging*). Em termos conceituais não existem diferenças entre as três etapas colocadas por SCHOWENGERDT 1983 e demais autores com as três primeiras etapas colocadas por LILLESAND e KIEFER. 1987

O pré-processamento se refere ao processamento inicial do conjunto de dados para se obter uma imagem corrigida radiométrica e geometricamente, estando inclusas as correções do efeito da atmosfera. O realce visa a melhoria da qualidade visual da imagem para fins de interpretação visual e/ou classificação. Já a classificação tem como objetivo o reconhecimento de objetos da cena a partir da análise quantitativa dos níveis de cinza (NOVO, 1992).

Enquanto o realce de imagem produz uma nova imagem realçada, a qual poderá ser visualizada, por exemplo, para interpretação visual, a saída do processo de classificação é um mapa temático, no qual cada *pixel* na imagem original foi classificado dentro de um dos muitos “temas” ou “classes” (SCHOWENGERDT, 1983).

Para LILLESAND e KIEFER (1987) ainda faltaria a fusão de dados (*data merging*), que consisti nos procedimentos para combinar um conjunto de dados provenientes de uma imagem tomada de uma certa área com outros dados geograficamente referenciados da mesma área. Este conjunto de dados pode simplesmente consistir de imagens geradas em outras datas pelo mesmo sensor, ou por outros sistemas de sensoriamento remoto. Frequentemente, o intento do *fusão* é combinar dados do sensoriamento remoto com outras fontes de informações no contexto de um sistema de informações geográfica (SIG).

Ainda segundo os mesmos autores, o realce de imagens tem como objetivo fornecer uma interpretabilidade visual de uma imagem pelo aumento da distinção aparente entre as feições numa cena. O processo de interpretação visual de imagens digitais realçadas tenta otimizar, de forma complementar, a habilidade da mente humana e do computador. A mente humana é excelente na interpretação de atributos espaciais numa imagem e é capaz de identificar feições obscuras ou discretas. Contudo, os olhos são pobres na discriminação de pequenas diferenças espectrais ou radiométricas que podem caracterizar tais feições. O realce computacional almeja a amplificação visual destas diferenças tênues tornando-os prontamente visíveis. A maioria das técnicas de realce podem ser categorizadas como operações locais ou pontuais. Operações locais modificam o valor de cada *pixel* baseado nos valores de brilho dos seus vizinhos.

Para NOVO (1992) dentre as técnicas de realce mais utilizadas, destacam-se :

- a) manipulação de contraste;
  - ampliação de contraste ,
  - transformação linear por partes.
- b) filtragem espacial; e
  - filtros passa alta,
  - filtros passa baixa.
- c) rotação de imagens.
  - transformação por componentes principais.

Para SABINS(1987) o realce pode ser obtido por :

- a) ampliação de contraste;
- b) transformação de intensidade, cor e saturação;
- c) fatiamento;
- d) realce de bordas;

- e) elaboração de mosaicos digitais; e
- f) produção de estéreo imagens sintéticas.

Já LILLESAND e KIEFER (1987) caracterizam as técnicas de realce como sendo:

- a) manipulação de contraste
  - limiar de nível de cinza (*gray-level thresholding*);
  - fatiamento e
  - ampliação de contraste.
- b) manipulação de feições espaciais
  - filtragem espacial;
  - realce de bordas; e
  - análise de Forrier.
- c) manipulação de multi-imagem
  - rotação e diferenciação de bandas multiespectrais;
  - componentes principais;
  - componentes canônicas;
  - componentes de vegetação; e
  - transformação espaciais de coloração (intensidade, cor e saturação).

Como pode-se notar, há muitas técnicas para realçar uma imagem. Será utilizada a divisão de NOVO, onde serão tratados o pré-processamento e realce. Dentro deste último, será dado ênfase à manipulação de contraste e filtragem espacial.

### 2.1.1 Técnicas de pré-processamento

Os dados obtidos na fotogrametria terrestre digital são provenientes de câmaras CCD e/ou de fotografias digitalizadas. Em ambos os casos, efeitos tais como : não alinhamento e irregularidades no espaçamento entre os sensores, e não linearidade da resposta espectral, estão presentes no instante da tomada da imagem ou durante o processo de digitalização de uma fotografia. Assim, é de particular interesse conhecer, modelar e corrigir tais erros (GALO, 1993; BETHEL, 1995).

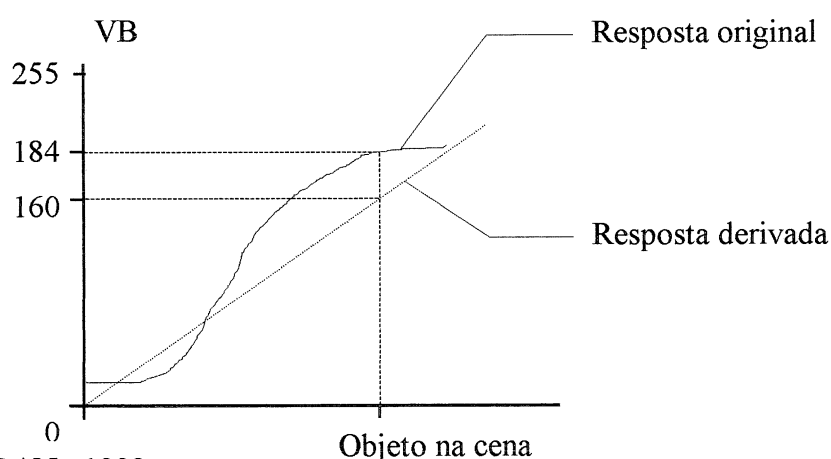
Segundo NOVO (1992), as técnicas de pré-processamento referem-se ao conjunto de técnicas que permitem a transformação de dados digitais brutos em dados corrigidos radiométrica e geometricamente.

#### 2.1.1.1 Correção Radiométrica

A correção radiométrica procura minimizar diferenças entre os níveis de cinza registrados por uma matriz de detectores. Tais diferenças decorrem de problemas de calibração dos detectores ou em função da não linearidade da resposta dos detectores à radiação da cena (NOVO, 1992).

Segundo CURRAN (1992), cada detector, dentro de um sensor, tem uma resposta curvilínea à irradiância. Quando a forma desta resposta é conhecida ela pode ser usada para transformar uma resposta não linear em uma resposta linear. Este procedimento é simples e requer apenas uma adição ou subtração de um valor de brilho para cada *pixel* da cena imageada. Por exemplo, na figura 1, o objeto imageado tem como resposta espectral VB = 184, enquanto esse valor deveria ser 160. Uma vez conhecido a verdadeira resposta espectral para o objeto, pode-se, então, efetuar a correção.

FIGURA 1 : Correção radiométrica dos dados



Fonte : CURRAN, 1992

Ainda pelo mesmo autor, nas imagens obtidas pelo Landsat MSS, a correção torna-se fácil devido ao conhecimento prévio da relação entre a resposta espectral original e a respectiva resposta linear para cada um dos 24 detectores. Assim, a correção deste efeito pode

ser facilmente incorporado a um aplicativo de processamento de imagens de sensoriamento remoto.

Outros efeitos presentes em imagens obtidas por câmaras digitais são os ruídos e a dispersão atmosférica. Segundo SCHOWENGERDT (1983), ruído é qualquer sinal não desejado ou distúrbio em uma imagem. Quando o ruído presente numa imagem for grande o suficiente para prejudicar a extração de informações, é necessário aplicar algum algoritmo de supressão de ruído. Os ruídos podem ser classificados em randômicos ou não. Um exemplo típico de ruído não randômico é quando um dos detectores do sensor não responde mais à irradiância que o atinge, e desta forma haverá, em todas as imagens obtidas por este sensor, uma linha ou várias linhas, que apresenta valor de brilho (VB) = 0. Os ruídos randômicos são mais complexos e requerem métodos mais sofisticados para a sua restauração. Ruídos randômicos típicos ocorrem com *pixels* individuais que possuem um VB muito discrepante dos seus vizinhos. Tais *pixels*, geram pontos muito claros ou escuros que degradam a imagem. Estes pontos, interferem basicamente em operações como classificação, e podem ser removidos por filtros digitais (SABINS, 1987).

Ainda segundo o mesmo autor, a atmosfera dispersa seletivamente os menores comprimentos de onda da luz, que produz um obscurecimento da imagem. Este obscurecimento as tornam pobre em contraste, que dificulta a interpretação visual das entidades presentes na cena. O efeito da dispersão atmosférica é bem mais apreciável em imagens de sensoriamento remoto do que em imagens de fotogrametria terrestre. Isso se deve a diferença que existe entre a distância sensor objeto nos dois casos. Na fotogrametria terrestre a porção de atmosfera entre o sensor e o objeto não é tão significativa quanto no sensoriamento remoto via aérea ou espacial, e nesse caso não faz sentido falar em correção de dispersão atmosférica.

Qualquer que seja a técnica de correção radiométrica, esta sempre acarretará alteração dos dados originais. Muitas vezes a aplicação descuidada de técnicas de correção radiométrica pode levar a uma total degradação do sinal original (NOVO, 1992).

De um modo geral, para a fotogrametria terrestre digital, os erros devido a digitalização de fotografias ou tomada de imagens com câmara CCD, com respeito aos efeitos físicos do detector, podem ser corrigidos e tem sido tema de estudos como mostram GALO (1993), GODDING et al (1992), BETHEL (1995) e BEYER (1992). Entretanto, como tal assunto se encontra fora do escopo deste trabalho, o mesmo não será tratado.



### 2.1.1.2 Correção Geométrica

A correção geométrica corresponde a reorganização dos *pixels* da cena, para que os mesmos possam ocupar uma dada posição na imagem e que a mesma guarde uma relação com um sistema de referência adotado. Em outras palavras, a correção geométrica corresponde a mudanças de propriedades geométricas da imagem correspondendo, basicamente, ao estudo de ortoimagem a ser tratado posteriormente.

### 2.1.2 Técnicas de realce

#### 2.1.2.1 Manipulação de Contraste

Para SCHOWENGERDT (1983) o contraste é um dos parâmetros de imagem e corresponde à variação dos níveis de cinza na mesma. Quanto maior a variação maior é o contraste e vice versa. O contraste (C) pode ser numericamente definido de várias formas, por exemplo :

$$C_1 = \frac{VB_{\max}}{VB_{\min}}$$

ou

$$C_2 = VB_{\max} - VB_{\min} \quad (01)$$

ou

$$C_3 = \sigma_{VB}$$

onde :

$VB_{\max}$  : valor máximo do nível de cinza presente na imagem;

$VB_{\min}$  : valor mínimo do nível de cinza presente na imagem; e

$\sigma_{VB}$  : desvio padrão do nível de cinza.

Ainda pelo mesmo autor, o contraste é uma propriedade de imagem importante por duas razões. Primeiro, a definição numérica da equação 01 pode ser usada para medir a razão

de sinal para ruído (*signal-to-noise ratio*) de uma imagem digital. Segundo, o contraste de uma imagem visualizada é um indicador da qualidade visual da mesma.

A manipulação de contraste é uma transformação radiométrica *pixel* por *pixel* que tem como objetivo distinguir, visualmente, feições nas imagens, anteriormente imperceptíveis aos olhos humanos. cada nível de cinza ou valor de brilho, é alterado por uma transformação específica, sem levar em consideração os seus *pixels* vizinhos (NOVO, 1992).

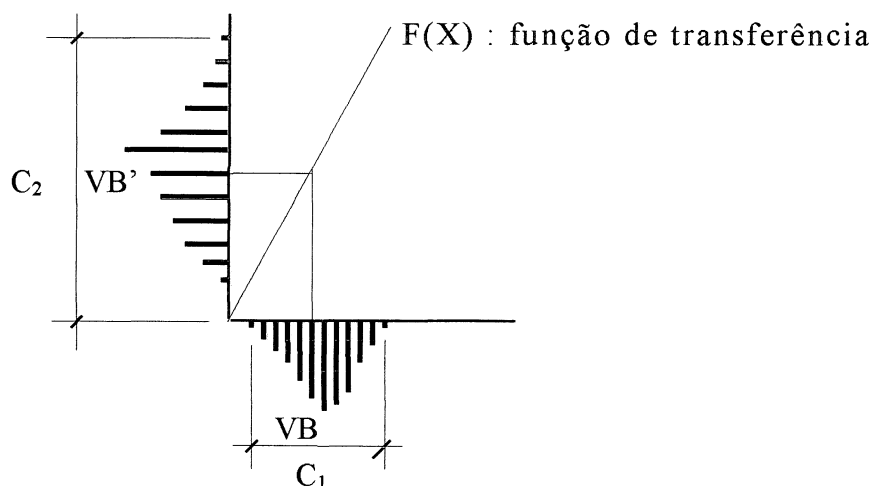
De acordo com CRÓSTA (1992), o aumento de contraste é provavelmente uma das mais poderosas, importantes e sem dúvida a mais usada das técnicas de processamento para extração de informações de imagens de sensoriamento remoto. Entretanto, deve-se ter em mente que o aumento de contraste não irá nunca revelar informação nova, que não esteja já contida na imagem original. Sua função é basicamente de apresentar a mesma informação contida nos dados brutos, porém de uma forma mais visível ao interprete.

NOVO (1992) nos diz que o primeiro passo nas técnicas de manipulação de contraste, conseqüentemente na técnica de aumento de contraste, deve ser a análise dos histogramas com frequência dos níveis de cinza de cada canal espectral, quando se trabalha com imagens multiespectrais. Os histogramas descrevem a distribuição estatística dos níveis de cinza em uma cena em termos da frequência de ocorrência de *pixels* para cada valor digital entre 0 e 63 ou 0 e 127 ou 0 e 255 de acordo com a resolução radiométrica do sensor.

Quando o contraste de uma imagem é modificado, o histograma da imagem resultante é diferente da imagem original, sendo a relação entre os dois histogramas especificado pela função de transferência de contraste. Essa operação é pontual, isto é, não depende das intensidades dos *pixels* ao redor do *pixel* considerado. A figura 2 mostra como é feita a transferência de contraste (CRÓSTA, 1992).

Na figura 2 pode-se notar o histograma da imagem original no eixo X, tendo uma variação entre o nível máximo e o nível mínimo de cinza representado por  $C_1$ , e no eixo Y o respectivo histograma expandido pela função de transferência  $F(X)$ , mostrando o aumento do contraste ocorrido ( $C_2$ ). Cada nível de cinza no eixo X será transformado pela função em seu correspondente sobre o eixo Y, como mostra a figura. Os *pixels* que possuem um valor de brilho VB terão como saída o valor VB'.

FIGURA 2 : Representação gráfica da função de transferência



Fonte : CRÓSTA (1992)

Dependendo da função de transferência, tem-se um aumento linear ou não. No caso da função  $F(X)$  ser uma reta tem-se uma ampliação de contraste linear, caso contrário tem-se uma ampliação de contraste não lineares (SABINS, 1987; NOVO, 1982; CRÓSTA, 1992; LILLESAND e KIEFER, 1987 e SCHOWENGERDT, 1983).

Para os casos lineares tem-se :

- a) Aumento Linear de Contraste e
- b) Aumento Bilinear de Contraste.

Para os casos não lineares tem-se :

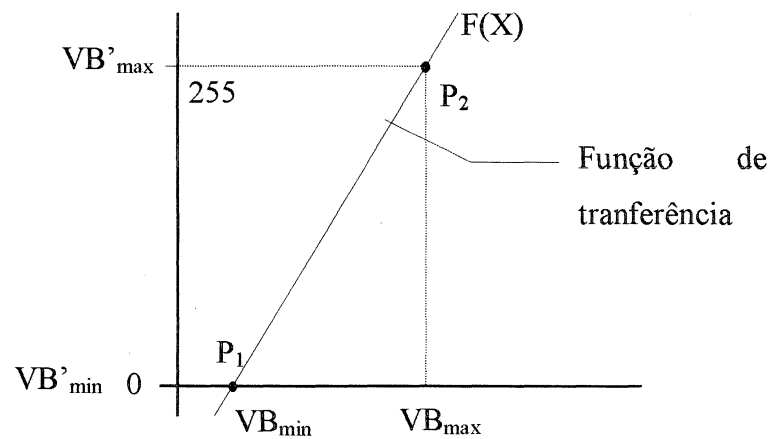
- a) Equalização de Histogramas;
- b) Normalização de Histogramas;
- c) Aumento Logarítmico de Contraste; e
- d) Aumento Exponencial de Contraste.

#### 2.1.2.1.1 Aumento de Contraste Linear

Neste tipo de aumento de contraste a função  $F(X)$  é uma reta, e apenas dois parâmetros são controlados: a inclinação da reta e o ponto de interseção com o eixo  $X$  (Figura 3). A inclinação controla a quantidade de aumento de contraste e o ponto de interseção com o eixo  $X$  controla a intensidade média na imagem (CRÓSTA, 1992).

Ainda pelo mesmo autor, uma característica deste tipo de realce é que o histograma da imagem gerada terá a mesma forma que o da imagem original. As diferenças estarão no valor médio dos níveis de cinza e no espalhamento destes níveis.

FIGURA 3 : Representação gráfica de uma reta passando por dois pontos



A função de transferência será da forma

$$Y = \frac{255}{VB_{max} - VB_{min}} \cdot (X - VB_{min}) + 0$$

(02)

$$Y = \left( \frac{X - VB_{min}}{VB_{max} - VB_{min}} \right) \cdot 255$$

onde:

Y : variável dependente correspondente aos níveis de cinza alterados;

VB<sub>max</sub> e VB<sub>min</sub> : Valores de brilhos máximos e mínimos presentes na imagem; e

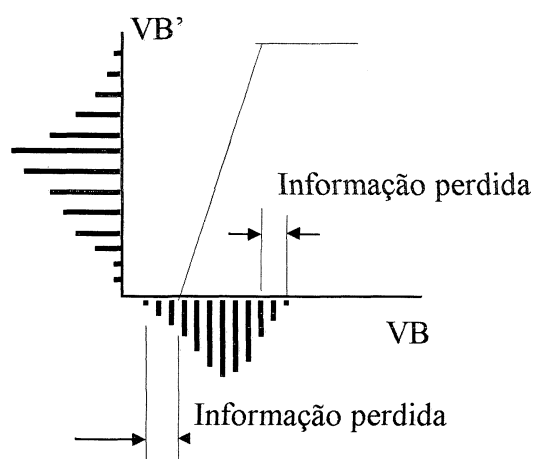
X : variável independente correspondente aos níveis de cinza a serem alterados;

### 2.1.2.1.2 Aumento de Contraste Linear Saturado

A inclinação e o ponto de interseção podem ser escolhidos pelo usuário de forma que os níveis de cinza na imagem contrastada excedam os limites permitidos. Neste caso diz-se que houve um aumento de contraste com saturação. Esse tipo de aumento de contraste promove uma perda de informação, uma vez que os níveis de cinza das extremidades do histograma original serão agrupados em uma única resposta, branco ( $VB' = 255$ ) ou preto ( $VB' = 0$ ), como mostra a figura 4 (CRÓSTA, 1992).

NOVO (1992) comenta que quando um histograma é assimétrico, torna-se difícil controlar a média do nível de cinza da imagem realçada e o nível de saturação nas extremidades, com a simples utilização de aumento linear. Nestes casos o aumento linear por partes é o mais indicado, ou seja faz-se o aumento de Contraste Bilinear. Com este tipo de transformação pode-se modificar a forma do histograma, reduzindo a assimetria, o que melhora a ampliação de contraste.

FIGURA 4 : Aumento de contraste com saturação



Fonte : CRÓSTA (1992)

### 2.1.2.1.3 Equalização de Histograma

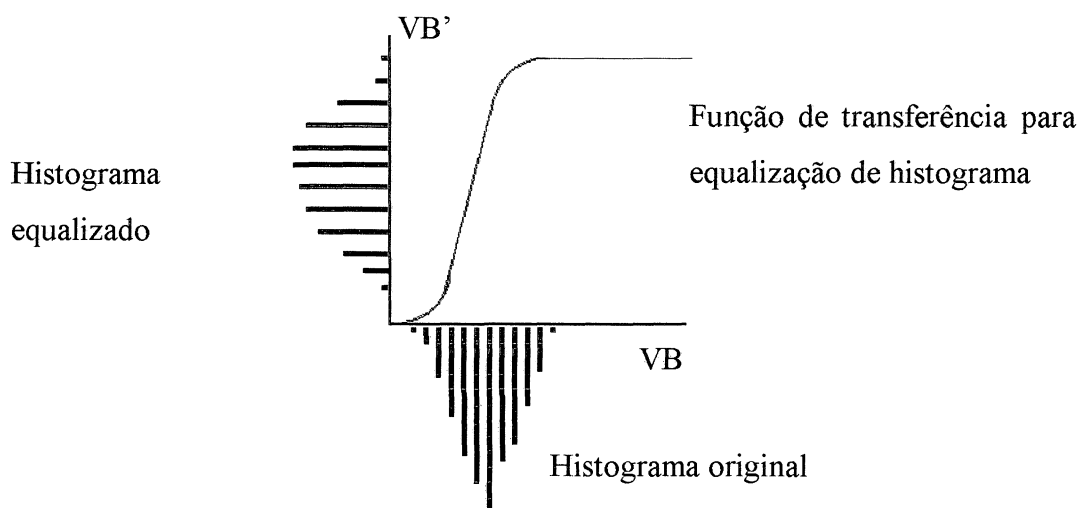
A Equalização de Histogramas parte do princípio que o contraste de uma imagem seria otimizado se todos os 256 possíveis níveis de cinza fossem igualmente utilizados. Obviamente

isso não é possível devido à natureza discretas dos dados digitais de uma imagem. Contudo, uma aproximação pode ser conseguida ao se espalhar os picos do histograma da imagem, deixando intocadas as partes mais “chatas” do mesmo, ver figura 5 (CRÓSTA, 1992).

Se a Função de Distribuição Cumulativa da imagem original (o número total de *pixels* no histograma entre zero e cada nível de cinza) é usado como função de transformação, após um escalonamento apropriado do eixo Y para corresponder à saída dos níveis de cinza, o histograma da imagem processada será aproximadamente uniforme (Gonzales e Wints, apud SCHOWENGERDT, 1983).

A Equalização de Histogramas tende à redução automática de contraste de muitas áreas escuras e claras para expandir os níveis de cinza médios na direção dos extremos da escala de radiância, isso se deve à forma gaussiana da maior parte dos histogramas de imagens (SCHOWENGERDT, 1983).

FIGURA 5 : Aumento de contraste por equalização



Fonte : CRÓSTA (1992)

Para obter o histograma equalizado deve-se seguir os seguintes passos (JENSEN, 1986):

a) encontrar a probabilidade de ocorrência de cada nível de cinza na imagem original, a qual é obtida dividindo-se a frequência de ocorrência do respectivo nível de cinza pelo número total de *pixels* na imagem, ou seja:

$$P(VB_i) = \frac{f(VB_i)}{m}, \text{ com } i = 0, \dots, 255 \quad (03)$$

onde:

$P(VB_i)$  : probabilidade do i-ésimo nível de cinza ou valor de brilho;

$f(VB_i)$  : frequência referente ao i-ésimo nível de cinza; e

$m$  : número total de *pixels* na imagem.

b) calcular a função de transformação ( $s_i$ ) para cada nível de cinza individual. Isto é feito calculando a curva de frequência acumulativa do histograma original usando o seguinte algoritmo :

$$s_i = \sum_{j=0}^i P_j, \text{ com } i = 0, \dots, 255 \quad (04)$$

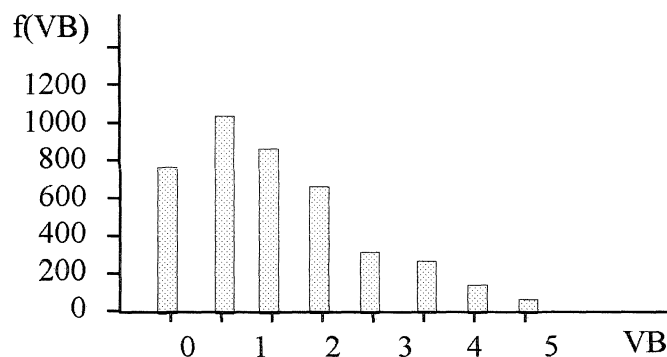
onde :

$P_i$  : probabilidade do i-ésimo nível de cinza.

c) comparar cada valor  $s_i$  com o nível de cinza  $VB_i$ , e assinalar cada uma destas transformações para o valor do nível de cinza (VB) mais próximo.

Para esclarecer o que foi dito anteriormente, tome-se o exemplo da figura 6 :

FIGURA 6 : Histograma de uma imagem hipotética a ser equalizada



Fonte : JENSEN (1986)

Uma imagem hipotética de  $64 \times 64$  *pixels* com VB variando de 0 a 7 tem o histograma da figura 6, resultando nos dados estatísticos da tabela 1 :

TABELA 1 : Estatística para uma imagem hipotética

Nível de cinza $VB_i$	Frequência $f(VB_i)$	Probabilidade $P(VB_i) = \frac{f(VB_i)}{m}$
$VB_0 = 0/7 = 0.00$	790	0.19
$VB_1 = 1/7 = 0.14$	1023	0.25
$VB_2 = 2/7 = 0.28$	850	0.21
$VB_3 = 3/7 = 0.42$	656	0.16
$VB_4 = 4/7 = 0.57$	329	0.08
$VB_5 = 5/7 = 0.71$	245	0.06
$VB_6 = 6/7 = 0.85$	122	0.03
$VB_7 = 7/7 = 1.00$	81	0.02

$m = 4096 \text{ pixels}$

Fonte : JENSEN (1986)

Aplicando o algoritmo descrito em (b), tem-se os valores de probabilidade da Tabela 2.

TABELA 2 : Valores da probabilidade acumulativa

$VB_i$	$S_i$
0	0.19
1	0.44
2	0.66
3	0.81
4	0.89
5	0.95
6	0.98
7	1.00

Executando o passo (c) obtém-se os dados da Tabela 2.



TABELA 3 : Identificação dos níveis de cinza mais próximos

$s_i$	Valor correspondente a $VB_i$ mais próximo
$(s_0)$ 0.19	0.14 ( $VB_1$ )
$(s_1)$ 0.44	0.42 ( $VB_3$ )
$(s_2)$ 0.66	0.71 ( $VB_5$ )
$(s_3)$ 0.81	0.85 ( $VB_6$ )
$(s_4)$ 0.89	0.85 ( $VB_6$ )
$(s_5)$ 0.95	1.00 ( $VB_7$ )
$(s_6)$ 0.98	1.00 ( $VB_7$ )
$(s_7)$ 1.00	1.00 ( $VB_7$ )

Houve uma supressão de classes de nível de cinzas, pois as classes de nível de cinza 3 e 4 foram agrupadas na classe  $VB_6$ , como também as classes de nível de cinza 5,6 e 7 foram agrupadas na classe  $VB_7$ . Assim, restaram apenas 5 classes das oitos existentes anteriormente, ou seja, as classes  $VB_1$ ,  $VB_3$ ,  $VB_5$ ,  $VB_6$  e  $VB_7$ .

Os dados resultantes da equalização da imagem são mostrados na Tabela 4 e figura 7.

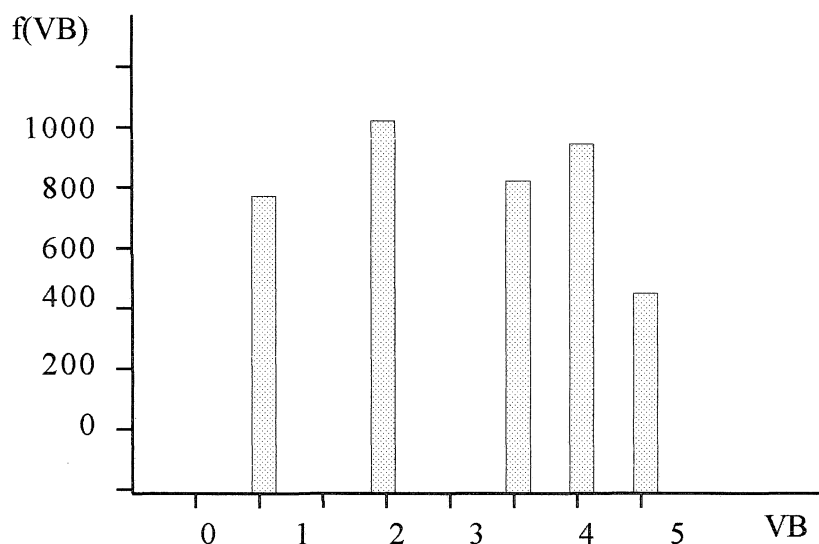
TABELA 4 : Estatística da imagem hipotética equalizada

Nível de cinza $VB_i$	Frequência $f(VB_i)$	Probabilidade
$VB_0 = 0/7 = 0.00$	0	0.00
$VB_1 = 1/7 = 0.14$	790	0.19
$VB_2 = 2/7 = 0.28$	0	0.00
$VB_3 = 3/7 = 0.42$	1023	0.25
$VB_4 = 4/7 = 0.57$	0	0.00
$VB_5 = 5/7 = 0.71$	850	0.21
$VB_6 = 6/7 = 0.85$	985	0.24
$VB_7 = 7/7 = 1.00$	448	0.11

$m = 4096$  pixels

Fonte : JENSEN (1986)

FIGURA 7 : Histograma da imagem hipotética equalizada



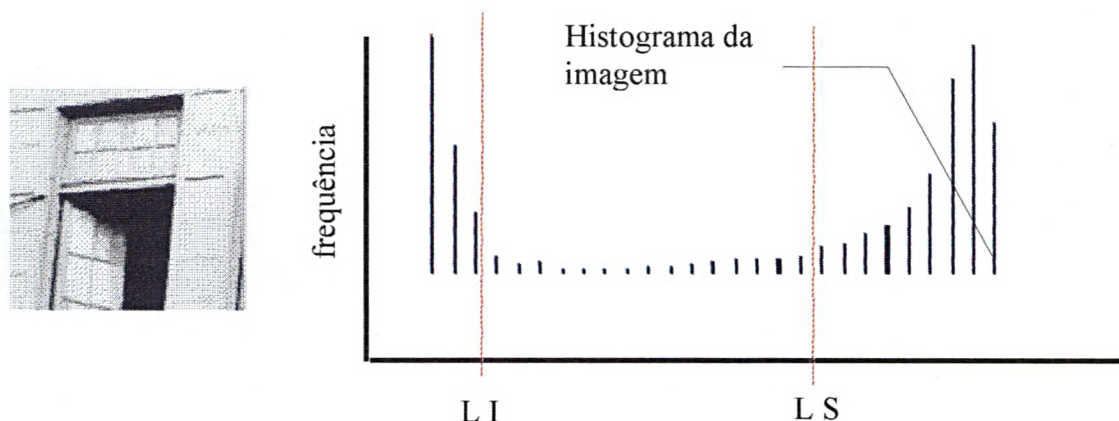
Fonte : JENSEN (1986)

#### 2.1.2.1.4 Limiar de Nível de Cinza

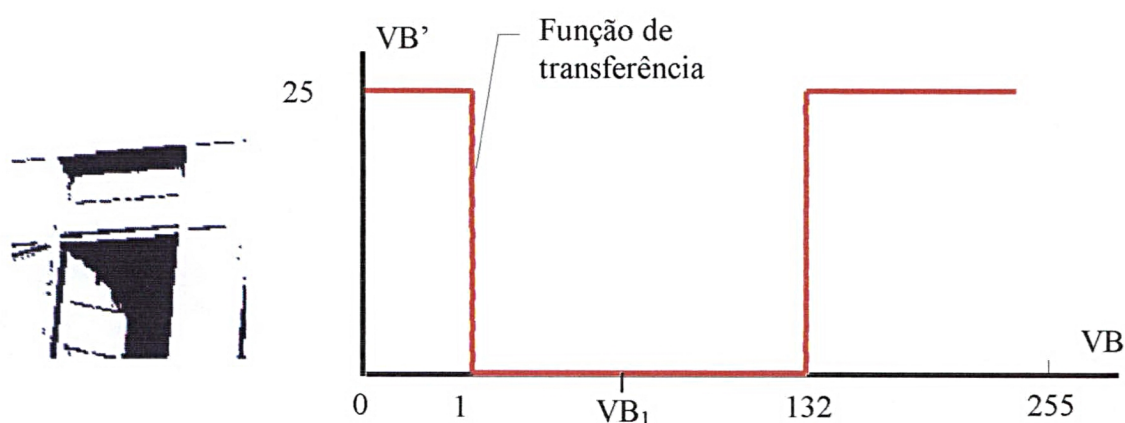
Limiar de nível de cinza é um tipo de manipulação de contraste que não é destinado para realce, no sentido da palavra colocada anteriormente. Ao invés, ele segmenta uma imagem em duas classes por um simples limite de nível de cinza (Fig. 8). O uso do limiar de nível de cinza, em certos tipos de imagens, resulta, de forma rápida, em uma imagem com limites espaciais definidos. Este tipo de operação pode ser utilizado para esconder porções da imagem (SCHOWENGERDT,1983).

Na figura 8, pode-se verificar que os valores de brilho que se encontram entre os limiares serão mapeados para preto, e aqueles que se encontram fora desse intervalo para branco. Por exemplo, o  $VB_1$  de um dado *pixel* pertence ao intervalo  $(10 \leq VB_1 \leq 132)$  assim, as componentes RGB a serem atribuídas para este *pixel* será (0,0,0), caso contrário será (255,255,255).

FIGURA 8 : Uma operação de limiar sobre uma imagem. a) imagem original; b) imagem processada.



a) Imagem original e seu respectivo histograma



b) Imagem Processada e a respectiva função de transferência

### 2.1.2.2 Filtragem Espacial

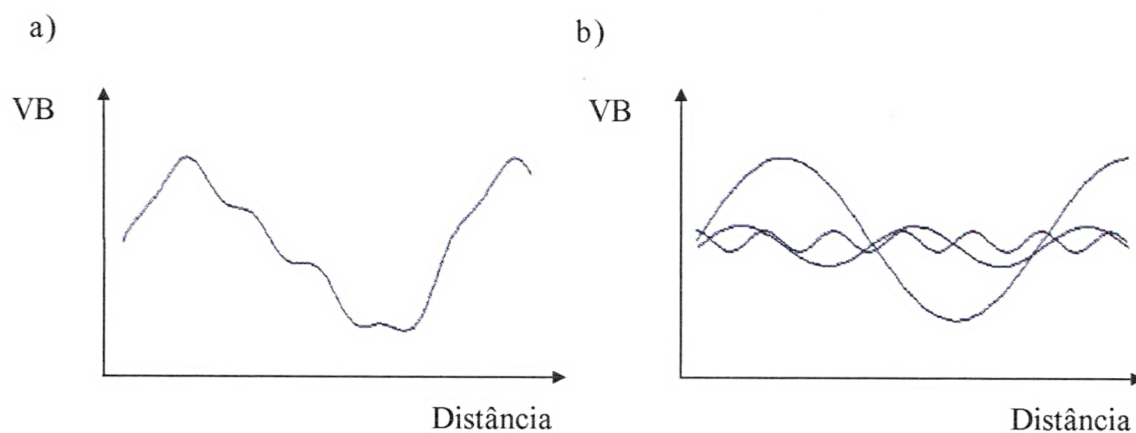
Em uma imagem de sensoriamento remoto observa-se que a intensidade de cinza varia bastante em função da distância. Ao se plotar estas variações em um gráfico de distância versus nível de cinza obtêm-se, geralmente, uma curva complexa (Fig. 9.a). Essa curva, por sua vez, pode ser decomposta em um conjunto de componentes senoidais com diferentes frequências e amplitudes (Fig. 9.b). Tais senóides fornecem uma idéia da distribuição espacial de frequência da imagem considerada. Nas figuras 9.a e 9.b tem-se um exemplo hipotético para uma distribuição unidimensional, que por sua vez não corresponde à natureza de uma imagem digital que é um fenômeno bidimensional (CRÓSTA, 1992).

Segundo o mesmo autor, a ilustração das figuras 9.a e 9.b pode caracterizar a variação do nível de cinza para uma dada linha da imagem digital, desta forma as senóides de alta frequência caracterizam as variações bruscas de níveis de cinza em pequenos espaços, as quais, geralmente, estão associadas com os limites entre feições distintas numa mesma imagem. Esse limite entre duas feições é conhecido como bordas. As senóides de baixa frequência caracterizam as variações suaves dos níveis de cinza que correspondem a limites gradacionais nas feições de mesma natureza na imagem.

O autor conclui que: a enorme mistura de frequências em uma imagem dificulta a interpretação de feições com frequências específicas. Para contornar esse problema e melhorar a aparência da distribuição espacial das informações, são utilizadas técnicas de filtragem espacial de frequências.

A filtragem fornece o meio de melhorar a imagem pela supressão ou realce de certas frequências espaciais, direções e texturas. Estes procedimentos podem ser tomados tanto no domínio da frequência como no domínio espacial. A filtragem no domínio da frequência é feita pela conversão da imagem usando transformadas como a de Forrier ou Hadamard. A filtragem no domínio espacial envolve a passagem de um filtro de  $N \times N$  *pixels* sobre a imagem convertendo o *pixel* central conhecido como "kernel" para o valor de uma certa operação efetuada sobre todos os *pixels* envolvidos pelo filtro, e esta operação é conhecida como convolução (CURRAN,1992).

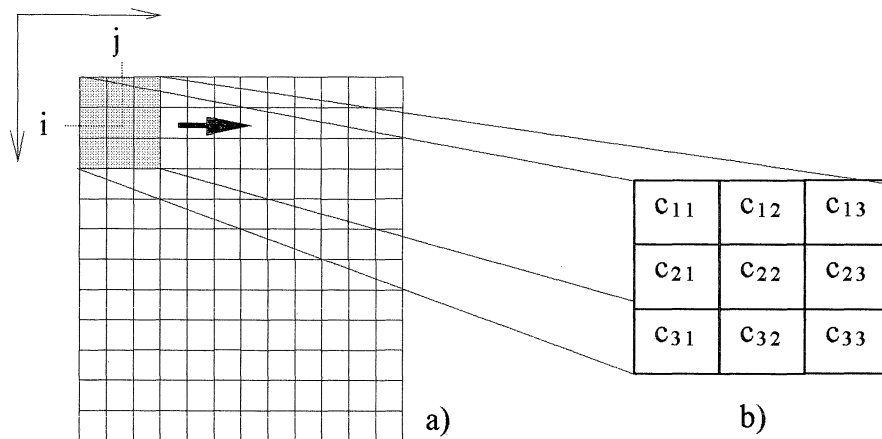
FIGURA 9 : Variações de VB ao longo de uma linha de uma imagem (a) sendo expressas por varias componentes senoidais (b) com diferentes amplitudes e frequências.



Fonte: CRÓSTA(1992)

Tanto a filtragem espacial, como a manipulação de contraste, são uma transformação *pixel a pixel*. A transformação neste caso depende tanto do *pixel* que esta sendo processado como também dos *pixels* vizinhos. Assim, a filtragem espacial depende do contexto no qual o *pixel* processado está inserido, uma vez que o nível de cinza (ou valor de brilho) deste será mudado para um valor que depende dos níveis de cinza da circunvizinhança, ver figura 10 (SCHOWENGERDT,1983).

FIGURA 10 : Visualização de uma máscara (b) passando sobre uma imagem (a).



Fonte: CRÓSTA(1992)

Na figura 10, a seta indica a direção de translado da máscara sobre a imagem. Para cada posição (i,j) o valor de brilho será alterado em função de alguma operação, onde os  $c_{kl}$  correspondem aos pesos utilizados na máscara. Por exemplo, se  $c_{kl} = 1$ ,  $i = 1$  e  $j = 1$  pode-se efetuar a seguinte operação :

$$\begin{aligned}
 VB_{1,1} = & (c_{11} \cdot VB_{0,0} + c_{12} \cdot VB_{0,1} + c_{13} \cdot VB_{0,2} + \\
 & c_{21} \cdot VB_{1,0} + c_{22} \cdot VB_{1,1} + c_{23} \cdot VB_{1,2} + \\
 & c_{31} \cdot VB_{2,0} + c_{32} \cdot VB_{2,1} + c_{33} \cdot VB_{2,2}) \cdot \frac{1}{9}
 \end{aligned} \tag{05}$$

resultando em :

$$VB_{1,1} = (VB_{0,0} + VB_{0,1} + VB_{0,2} + VB_{1,0} + VB_{1,1} + VB_{1,2} + VB_{2,0} + VB_{2,1} + VB_{2,2}) \cdot \frac{1}{9} \tag{06}$$

que corresponde a :

$$VB_{i,j} = \frac{\left( \sum_{k=(i-1)}^{(i+1)} \sum_{l=(j-1)}^{(j+1)} VB_{k,l} \right)}{9}, \text{ com } i \text{ e } j = 1 \quad (07)$$

Tal operação atribui para o *pixel* (i,j) a média aritmética dos valores de brilho dos *pixels* relacionados com a máscara na posição (i,j). Ao fazer i e j variar dentro da sua amplitude, tem-se uma operação de filtragem sobre a imagem, para um filtro 3 x 3.

NOVO (1992) classifica os filtros espaciais em dois grandes grupos: filtros passa alta e filtros passa baixa.

Segundo CURRAN(1992) e CRÓSTA(1992) existem muitos tipos de filtros espaciais em uso. Contudo, os quatro mais populares são : filtro passa alta, filtro passa baixa, filtros texturais e direcionais.

De acordo com SCHOWENGERDT(1983) os filtros espaciais são baseados em três tipos básicos: passa alta , passa baixa e passa banda. Estes filtros básicos podem ser combinados aditivamente para formar uma ampla variedade de filtros mais complexos.

Ainda que exista uma diferença entre os autores citados, no que diz respeito aos filtros, serão tratados aqui apenas os passa altas e os passa baixas.

#### 2.1.2.2.1 Filtros Passa Baixas

De acordo com CRÓSTA(1992), os filtros passa baixa possuem esse nome pelo fato de eliminarem as altas frequências da imagem deixando "passar" somente as baixas frequências. Desta forma, como ele realça as baixas frequências na perda das altas, foi apelidado de filtro de suavização ou de desfocalização (CURRAN,1992).

Segundo NOVO (1992) e SCHOWENGERDT (1983), os filtros passa baixas são utilizados, geralmente, para atenuar o efeito dos ruídos existentes numa cena imageada (ruídos devidos a diferenças de sensibilidade dos detectores e erros na transmissão do sinal).

O grande problema dos filtros passa baixas é o efeito que se assemelha à desfocalização da imagem, que por sua vez promove a perda de informações de detalhes.

Entretanto, existem alguns tipos de filtros passa baixas que permitem a retenção de detalhes ou bordas. Nesse tipo de filtro a soma dos pesos usados na máscara igual a 1 (CRÓSTA,1992).

$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$
$c_{21}$	$c_{22}$	$c_{23}$
$c_{31}$	$c_{32}$	$c_{33}$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} = 1$$

Segundo o mesmo autor os tipos de filtros passa baixas mais comuns são: filtro de média, filtro da moda, filtro da mediana e filtro do mínimo.

#### a) Filtro da Média

Esse é um dos tipos de filtros passa baixas mais simples. O seu efeito é o de substituir o nível de cinza do *pixel* original pela média aritmética dos níveis de cinza dos *pixels* que compõe a máscara. Uma máscara de dimensão 3 x 3 de um filtro da média teria os seguintes pesos:

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Seja por exemplo, os valores de brilho vizinhos para uma posição genérica (i,j) na imagem, na qual se utiliza uma máscara 3x3,

	i-1	i	i+1
j-1	6	9	2
j	2	3	10
j+1	1	5	2

o valor de brilho a ser atribuído ao *pixel* (i,j) será 4, pois a média dos valores de brilho é :

$$\frac{(6 + 9 + 2 + 2 + 3 + 10 + 1 + 5 + 2)}{9} = 4,444...$$

## b) Filtro da Moda

É um outro tipo de filtro passa baixa, onde se define uma vizinhança em torno do ponto e considera o valor de brilho de maior frequência nesta vizinhança.

Seja por exemplo, os valores de brilho vizinhos para uma posição genérica  $(i,j)$  na imagem, na qual se utiliza uma máscara  $3 \times 3$ ,

	i-1	i	i+1
j-1	6	9	2
j	2	3	10
j+1	1	5	2

o valor de brilho a ser atribuído ao *pixel*  $(i,j)$  será 2, pois este é o valor de brilho que mais se repete dentro da máscara.

## c) Filtro da Mediana

Neste tipo de filtro passa baixa, se define uma vizinhança em torno do ponto, ordena os valores de brilho e considera a mediana dessa ordenação.

Seja por exemplo, os valores de brilho vizinhos para uma posição genérica  $(i,j)$  na imagem, na qual se utiliza uma máscara  $3 \times 3$ ,

	i-1	i	i+1
j-1	6	9	2
j	2	3	10
j+1	1	5	2

o valor de brilho a ser atribuído ao *pixel*  $(i,j)$  será 3, pois, ordenando os valores de brilhos tem-se [10, 9, 6, 5, 3, 2, 2, 2, 1], cuja mediana é 3.

Como a máscara usada é de  $3 \times 3$ , a mediana ocorrerá sempre na posição 5 do vetor de VB ordenado.



#### d) Filtro do Mínimo

Neste tipo de filtro passa baixa, se define uma vizinhança em torno do ponto e considera o menor valor de brilho.

Seja por exemplo, os valores de brilho vizinhos para uma posição genérica (i,j) na imagem, na qual se utiliza uma máscara 3x3

	i-1	i	i+1
j-1	6	9	2
j	2	3	10
j+1	1	5	2

o valor de brilho a ser atribuído ao *pixel* (i,j) será 1, pois, este é o menor VB do conjunto {10, 9, 6, 5, 3, 2, 1}.

#### 2.1.2.2.2 Filtros Passa Altas

São filtros que eliminam os registros de baixa frequência, deixando os de altas frequências. Geralmente são utilizados para realçar regiões de transição dentro de uma cena, tais como os limites de campo de cultivo, falhas geológicas etc. (NOVO, 1992) e (SCHOWENGERDT, 1983).

Para CURRAN(1992), a grande utilidade dos filtros passa altas é a restauração de informações de alta frequências que tenham sido perdidas com o resultado da amostragem discreta.

Assim como nos filtros de suavização, a dimensão da máscara de convolução influencia no resultado final. Quanto menor a máscara, menor serão os detalhes a serem realçados. Desta forma, como regra geral, um filtro passa alta normalmente vai realçar feições de dimensões menores do que a dimensão da máscara usada. Nesse tipo de filtro a soma dos pesos usados na máscara é igual a 0 (CRÓSTA, 1992).

$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$
$c_{21}$	$c_{22}$	$c_{23}$
$c_{31}$	$c_{32}$	$c_{33}$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} = 0$$

Ainda pelo mesmo autor, os filtros passa altas mais comuns são:

- a) filtro do máximo;
- b) filtros laplacianos; e
- c) filtros direcionais.

#### a) Filtro do Máximo

Neste tipo de filtro, se define uma vizinhança em torno do ponto e considera o maior valor de brilho.

Seja por exemplo, os valores de brilho vizinhos para uma posição genérica (i,j) na imagem, na qual se utiliza uma máscara 3x3.

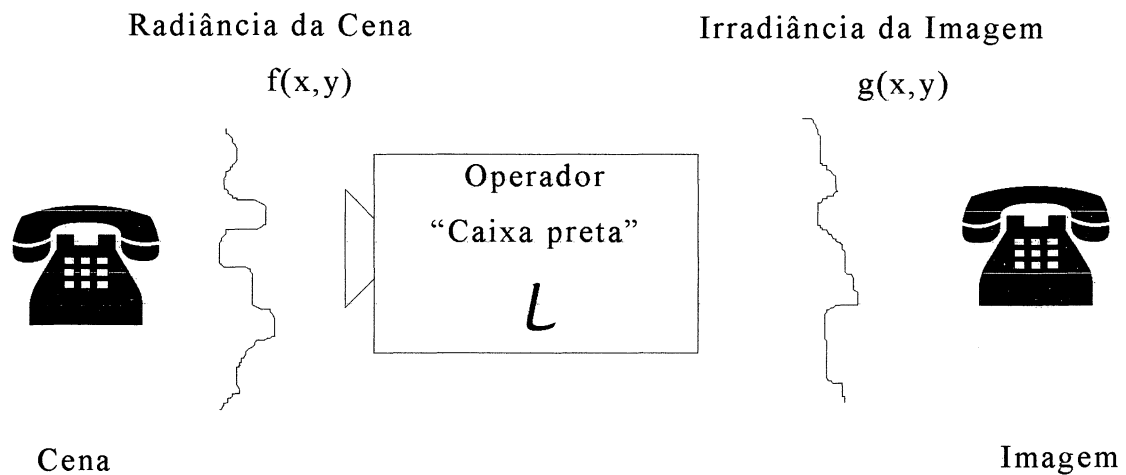
	i-1	i	i+1
j-1	6	9	2
j	2	3	10
j+1	1	5	2

o valor de brilho a ser atribuído ao *pixel* (i,j) será 10, pois, este é o maior VB do conjunto {10, 9, 6, 5, 3, 2, 1}.

#### b) Filtros Laplacianos

Pode-se considerar um sistema de formação de imagem como uma "caixa preta" que opera sobre um sinal de entrada para produzir um sinal de saída (GASXILL apud SCHOWENGERDT, 1983). O sinal de entrada é a radiância da cena e o de saída é a irradiância da imagem; ambos são funções de coordenadas espaciais. Para efeitos de simplificação pode-se representar o sinal de saída como o resultado de um operador  $L$  sobre o sinal de entrada, como mostra a figura abaixo.

FIGURA 11 : um sistema de formação de imagem



fonte : SCHOWENGERDT (1983)

Considerando a função  $g(x,y)$  como a representação da cena imageada, pode-se aplicar sobre esta os operadores diferenciais lineares (gradiente, rotacional e divergente). Em particular, o operador gradiente ( $\nabla$ ) quando aplicado sobre uma função escalar retorna a direção da máxima variação dessa função, isto é, o operador gradiente quando aplicado sobre uma função escalar retorna uma função vetorial a qual reflete a máxima variação da função escalar no ponto considerado. Já o operador divergente ( $\nabla$ ) é aplicado a funções vetoriais e tem como retorno um escalar (SCHOWENGERDT, 1983).

O LAPLACIANO ( $\nabla^2$ ) de uma função escalar pode ser dado como sendo o divergente do gradiente desta função, ou seja:

$$\nabla^2 f = \nabla \cdot (\nabla f) \quad (08)$$

onde:

$f$ : é uma função escalar do tipo  $f(x,y)$ .

O resultado do operador LAPLACIANO sobre uma função escalar é:

$$\nabla^2 f = \nabla \cdot \left( \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \vec{j} \right) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (09)$$

A magnitude do LAPLACIANO pode ser dado por:

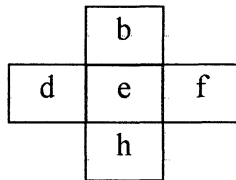
$$|\nabla^2| = \sqrt{(\nabla_1^2)^2 + (\nabla_2^2)^2} \quad (10)$$

onde:

$$(\nabla_1^2) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \quad (11)$$

$$(\nabla_2^2) = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (12)$$

Para o caso discreto tem-se:



$$\nabla_1^2 = (d - e) - (e - f) \quad (13)$$

$$\nabla_2^2 = (h - e) - (e - b) \quad (14)$$

que resulta  $\Delta^2 = b + d + f + h - 4e$ . Como um filtro passa alta a soma dos elementos deve ser nula tem-se a seguinte máscara:

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

De acordo com CRÓSTA (1992), as imagens produzidas por filtragem passa alta, embora ricas em informações textural, são geralmente pobre em contraste, com pouca informação tonal, sendo portanto de difícil interpretação. Uma maneira de se manter o contraste da imagem original, e consequentemente a informação tonal, ao mesmo tempo em que se tenha o realce de bordas, é adicionar a imagem filtrada à imagem original. Este processo pode ser feito por meio do **filtro laplaciano + original**. Para isso, adiciona-se a unidade ao valor central da máscara, a qual passaria a ser :

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

Ainda pelo mesmo autor, para se obter bons resultados neste tipo de filtragem, o ideal é adicionar a imagem original com um peso bem maior do que a versão filtrada. Assim, em vez de se colocar o peso de 5 no valor central da máscara, pode-se colocar o valor entre 10 e 15, dependendo da imagem que está sendo filtrada.

Outros filtros laplacianos podem ser montados a partir do princípio que a soma dos valores da máscara deva ser zero, com isso a máscara anterior poderia ter um outro aspecto, tal como:

-1	-1	-1
-1	+8	-1
-1	-1	-1

+1	-2	+1
-2	+4	-2
+1	-2	+1

### c) Filtros Direcionais

Estes tipos de filtros são um tipo especial de filtros passa altas, que possuem a característica de realçar bordas em direções determinadas. Eles são na verdade uma combinação de filtragem passa alta e limiarização de níveis de cinza. Os filtros direcionais podem ter apenas uma dimensão (horizontal ou vertical) (CRÓSTA,1992).

Para SCHOWENGERDT(1983), o realce de bordas em todas as direções pode ser obtido pela filtragem da imagem em duas direções ortogonais, isto é, horizontalmente e verticalmente, combinando os resultados num vetor. A magnitude do gradiente local da imagem é dada pelo comprimento do vetor, e a direção é dada pelo ângulo entre as componentes do mesmo sobre os eixos. Estes filtros são conhecidos como filtros gradientes.

O GRADIENTE ( $\nabla$ ) aplicado a uma função escalar é dado por:

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \vec{j} \quad (15)$$

onde:

$f$ : é uma função escalar do tipo  $f(x,y)$ .

A magnitude do GRADIENTE pode ser dada por :

$$|\nabla| = \sqrt{(\nabla_1)^2 + (\nabla_2)^2} \quad (16)$$

onde :

$$(\nabla_1) = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (17)$$

$$(\nabla_2) = \frac{\partial f}{\partial y} \quad (18)$$

A direção pode ser dada por :

$$\Phi = \tan^{-1} \left( \frac{\nabla_2}{\nabla_1} \right) \quad (19)$$

Em concordância com esta teoria numerosos filtros gradientes tem sido propostos, entretanto os mais conhecidos são os de Roberts, de Sobel e Prewitt.

Para o caso de realce de bordas em uma direção específica pode-se optar pelas seguintes máscaras:

1) máscaras de filtros horizontais

-1	+1
----	----

2) máscaras de filtros verticais

+1
-1

### 3) máscaras do filtro gradiente (primeira derivada), filtros de Prewitt

Norte

+1	+1	+1
+1	-2	+1
-1	-1	-1

Sul

-1	-1	-1
+1	-2	+1
+1	+1	+1

Leste

-1	+1	+1
-1	-2	+1
-1	+1	+1

Oeste

+1	+1	-1
+1	-2	-1
+1	+1	-1

NW

+1	+1	+1
+1	-2	-1
+1	-1	-1

NE

+1	+1	+1
-1	-2	+1
-1	-1	+1

SW

+1	-1	-1
+1	-2	-1
+1	+1	+1

SE

-1	-1	+1
-1	-2	+1
+1	+1	+1

### 4) máscaras do filtro gradiente (primeira derivada), filtros de Sobel

Norte

+1	+2	+1
0	0	0
-1	-2	-1

Sul

-1	-2	-1
0	0	0
+1	+2	+1

Leste

-1	0	+1
-2	0	+2
-1	0	+1

Oeste

+1	0	-1
+2	0	-2
+1	0	-1

NW

+2	+1	0
+1	0	-1
0	-1	-2

NE

0	+1	+2
-1	0	+1
-2	-1	0

SW

0	-1	-2
+1	0	-1
+2	+1	0

SE

-2	-1	0
-1	0	+1
0	+1	+2

## 2.2 FOTOGRAMETRIA TERRESTRE

Segundo KARARA (1989), fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informações quantitativas seguras sobre objetos físicos e do meio ambiente através de processos de registros, medidas e interpretação de imagens fotográficas e padrões de imagens

derivadas a partir do sistema sensor. Desde o surgimento da fotogrametria, a sua principal aplicação tem sido na compilação de mapas topográficos à base de mensurações obtidas primeiramente a partir de fotografias aéreas e espaciais empregando simulações ópticas, mecânicas, ótico-mecânicas e matemáticas para uma avaliação analógica ou digital. Como uma eficiente, econômica e conveniente ferramenta de mapeamento, a fotogrametria tem sido desenvolvida dentro de uma técnica de mensuração altamente segura e precisa.

Ainda pelo mesmo Autor, desde o seu início, tanto fotogrametristas como cartógrafos têm tentado aplicar a fotogrametria fora do campo do mapeamento topográfico. Aplicações fora do domínio topográfico têm sido englobadas pelo termo 'Fotogrametria Não Topográfica'. Para distâncias relativamente pequenas, o termo 'Fotogrametria a Curta Distância' é normalmente usado. Através dos anos o termo 'Aplicações Especiais de Fotogrametria' tem sido usado em alguns países. Entretanto, os termos "Não Topográfico", "Curta Distância" e "Especial" são tratados como sinônimos para descrever aplicações fotogramétricas em outras áreas que não seja a do mapeamento topográfico.

Na maioria das aplicações de Fotogrametria à Curta Distância as estações de observações se encontram colocadas diretamente no solo ou próximas deste, surgindo daí o termo Fotogrametria Terrestre. Quando a distância entre a estação e o objeto é de até 200m costuma-se chamar de Fotogrametria à Curta Distância, embora este limite não seja rigoroso e o consenso quanto a sua variação não existe (SILVA e DALMOLIN, 1995).

O progresso expressivo da indústria da computação durante as últimas décadas alterou o caminho tradicional da fotogrametria. Passou-se muito rápido da era analógica para a era analítica e por fim para a era digital. Este processo causou uma grande mudança de atitude e vários problemas cartográficos foram contornados por meio de aproximações. Velocidade e acurácia, sem sombra de dúvida, foram enormemente melhoradas, mas o principal benefício encontra-se na simplificação de vários procedimentos. Desta forma, a fotogrametria tornou-se disponível também para leigos. Arqueólogos, arquitetos, geólogos e tantos outros cientistas, podem, agora, extrair informações quantitativas confiáveis a partir de fotografias adquiridas por eles próprios. Somente precisam efetuar algumas medidas simples nas imagens, quer seja analógica ou digital, com o auxílio dos equipamentos adequados, para poderem extrair os dados de seus interesses (GEORGOPOULOS, 1992).

Desde o seu surgimento até os dias atuais, a fotogrametria a curta distância, quer seja digital ou analógica, alcançou um grau de sofisticação tal que ela passou a ser utilizada em um



número diverso de aplicações tais como: modelagem de partes do corpo humano; estudo do movimento de objetos; estruturas arquitetônicas; automação industrial; visão de máquina e robótica; perícia e arqueologia (GRÜN e MAAS, 1994; MÜFTÜOĞLU e ÖRMECI, 1992).

Os métodos empregados na Fotogrametria Arquitetural podem ser: analógico, analítico ou digital. Entretanto, o método digital representa, atualmente, o campo mais promissor nesta área devido aos avanços tecnológicos da computação e dos equipamentos de coleta de dados (WALDHÄUSL, 1992; Astori B. et al., 1992; STREILEIN, BEYER e KERSTEN, 1992).

Dentro do campo digital, a Fotogrametria Arquitetural utiliza-se das técnicas de Estereofotogrametria, Fotogrametria Bidimensional, Retificação Simples e Retificação Diferencial para gerar os produtos adequados para os seus fins (CARBONNEL, 1989; FELLBAUN, 1992; PALLASKE, MARTEN e MAUELSHAGEN., 1994; PATIAS e ROSSIKOPOULOS, 1992; Astori B. et al., 1992). Segundo DAL POZ (1996), a técnica de monorestituição também pode ser utilizada para a redução dos dados, sendo esta uma das duas técnicas abordadas neste trabalho.

Para SILVA (1995), os obstáculos para se executar um levantamento de precisão utilizando a Fotogrametria à Curta Distância no Brasil, sob o ponto de vista prático da engenharia, consiste exatamente na dificuldade de acesso a programas operacionais que permitam fácil análise da exatidão e precisão. Os demais instrumentos como câmaras e traçadores analíticos de alta resolução são disponíveis.

Segundo MENDONÇA (1995) os primeiros trabalhos de fotogrametria terrestre no Brasil foram realizados em 1977, no levantamento da fachada do teatro Municipal do Rio de Janeiro. Entretanto, para GOMES et al. (1995), as primeiras experiências no Brasil começaram em 1977 com o levantamento das fachadas do Castelo da Torre de Garcia D'Avila, próximo a Salvador - BA. Não entrando neste mérito, pode-se dizer que as primeiras experiências brasileiras ocorreram depois de 119 anos do primeiro levantamento de fotogrametria terrestre na Europa, no ano de 1858.

Em 1993, a Sociedade Brasileira de Cartografia, no XVI Congresso, aprovou uma resolução indicando a necessidade do Brasil realizar o levantamento Fotogramétrico dos sítios históricos. Em 1994 foi criado o Grupo de Trabalho com a finalidade de desenvolver o Anteprojeto do Cadastro Fotogramétrico de Monumentos Históricos do Brasil. Em 1995 foi estabelecido a proposição de uma metodologia para a criação e manutenção do Cadastro

Fotogramétrico de Monumentos Históricos do Brasil, o qual se encontra nos Anais do XVII Congresso Brasileiro de Cartografia (MENDONÇA, 1995; GOMES et al., 1995).

### 2.2.1 Sistemas Fotogramétricos

Em qualquer processo fotogramétrico existem duas fases principais: (a) aquisição de dados a partir do objeto a ser medido pela tomada de fotografias necessárias; (b) redução das fotografias, a mapas ou coordenadas espaciais, isto é, convertendo as fotografias em dados digitais ou analógicos. Assim, um sistema fotogramétrico pode ser subdividido em duas partes: aquisição de dados e redução de dados (ATKINSON, 1989).

#### 2.2.1.1 *Aquisição de Dados*

O sistema de aquisição de dados tem por objetivo adquirir dados brutos ou informações brutas, ambos representados pela fotografia analógica ou imagem digital. Os dados para a fotogrametria terrestre podem ser obtidos tanto por câmaras baseadas em filmes como por câmaras digitais. As câmaras convencionais, baseadas em filmes, fornecem uma resolução fotogramétrica ainda não superada pelas câmaras digitais. Tomando, por exemplo, uma fotografia de câmara de filme de formato médio (6 x 6 cm) e uma imagem com uma câmara de sensor sólido, seria necessário obter, desta última, uma resolução superior a 6000 x 6000 *pixels* ou 2540 dpi, para se equiparar com a primeira. Entretanto, a diferença entre estas câmaras, em termos de resolução, estão diminuindo continuamente. Quando se trabalha com sistemas digitais tem-se o inconveniente da digitalização das fotos fornecidas pelas câmaras baseadas em filmes (STREILEIN, BEYER e KERSTEN, 1992).

As câmaras usadas na obtenção de fotografias podem ser classificadas em métricas, semi-métricas e não métricas. Elas podem ser simples, isto é, uma única câmara, ou estereométricas - duas câmaras. Câmaras semi-métricas e não métricas são câmaras que não foram projetadas para propósitos fotogramétricos, e nessas categorias são incluídas as câmaras amadoras, profissionais e digitais (ATKINSON, 1989; GOMES et al., 1995).

As fotografias ou imagens obtidas apresentam erros sistemáticos. Uma vez conhecida as origens dos erros sistemáticos pode-se reduzi-los através de modelos matemáticos que os relacionem. Segundo MCGLONE (1989), é necessário, antes da redução dos dados, as correções dos erros sistemáticos que são produzidos pelos equipamentos de medições de fotocoordenadas (comparadores), pelas distorções de imagem e pela refração atmosférica.

#### a) Câmaras simples

Câmaras simples são câmaras métricas e/ou semi-métricas que podem ou não ser acopladas a teodolitos. Muitas dessas câmaras consistem em duas partes: um suporte para orientação que pode ser montado sobre um tripé e a câmara propriamente dita. Podem operar com placas de vidro e filmes. As câmaras métricas são caracterizadas por uma grande estabilidade física (os parâmetros que modelam as imperfeições do sistema permanecem estáveis por um longo período e são conhecidos a princípio) e pela presença de marcas fiduciais. As câmaras semi-métricas falham em alguns pontos, como por exemplo a ausência de marcas fiduciais, mas permitem modelar alguns problemas inerentes ao sistema (FAIG, 1989).

#### b) Câmaras estereométricas

As estereométricas são constituídas de duas câmaras métricas ou semi-métricas montadas rigidamente em uma base de comprimento definido, com os eixos óticos paralelos uns aos outros e perpendiculares à base (caso normal da fotogrametria). Assim, as distâncias mínimas e máximas ao objeto e a precisão máxima que se pode obter, são consequências da geometria fixa da câmara estereométrica. Assim, como as câmaras métricas simples, as estereométricas podem operar com chapas de vidro e/ou filme (FAIG, 1989; GOMES et al., 1995).

#### c) Câmaras não métricas

Câmaras não métricas são câmaras que não foram projetadas para propósitos fotogramétricos. O uso de câmaras não métricas em relação às métricas, para fins

fotogramétricos tem apresentado vantagens e desvantagens (ATKINSON, 1989). Como vantagens pode-se citar : Fácil aquisição; Flexibilidade de variação de foco; Podem ser manuseadas de forma a serem orientadas em uma dada direção. E como desvantagens cita-se: As lentes são desenhadas para uma alta resolução a custo de alta distorção; instabilidade na orientação interior; ausência de marcas fiduciais, e falta de nível de bolha dificulta a orientação exterior antes da exposição.

O uso de câmaras não métricas para fins fotogramétricos exige o conhecimento dos parâmetros que definem tanto geometria do sistema como os que modelam os erros sistemáticos. Assim, deve-se resolver os seguintes problemas para que uma câmara não métrica possa ser usada para propósitos fotogramétricos: orientação interior; orientação exterior e modelagem das distorções do filme (FAIG, 1989).

Esforços concentrados, tanto na pesquisa como no desenvolvimento, têm resultado em um número de aproximações de redução de dados particularmente adequado para fotografia não métrica. Essas aproximações são baseadas em técnicas analíticas altamente sofisticadas que combinam, em muitos casos, a fase de calibração e avaliação. Através do uso destas técnicas é possível reduzir ou eliminar completamente os efeitos das desvantagens das câmaras não métricas. Entretanto, o custo dos sistemas fotogramétricos para tais aplicações são mais elevados em relação ao custo da câmara (ATKINSON, 1989).

#### 2.2.1.2 Redução de dados

O sistema de redução de dados tem por objetivo a conversão dos dados brutos para uma forma adequada, de forma que os mesmos possam ser utilizados da maneira pretendida. A forma final dos dados pode ser analógica, como por exemplo, um mapa, ou digital , tais como coordenadas espaciais. Assim, para a redução de dados tem-se a disposição de sistemas analógicos, analíticos ou digitais (MIKHAIL, 1989; MCGLONE, 1989; FAIG, 1989).

Quando se faz uso de câmaras métricas para obtenção de dados, os erros sistemáticos causados pelo desvio físico a partir da perspectiva central teórica, são compensados num primeiro estágio da redução. Isto é possível devido ao conhecimento *a priori* destes efeitos. Contudo, por várias razões, a maioria destes efeitos permanecem sem conhecimento quando câmaras, não métricas ou semi-métricas, são usadas na obtenção de dados. Assim, ou a

compensação é integrada dentro da solução ou aceita-se a perda de precisão no resultado final. Para apreciar isto, é necessário identificar os problemas e providenciar uma maneira de contorná-los. Desta forma, problemas como a recuperação dos parâmetros da orientação exterior, interior e deformação do filme devem ser modelados.

Da forma como os problemas são contornados na fotogrametria a curta distância, tem-se aproximações analógicas, semi-analíticas, analíticas ou digitais (FAIG, 1989).

#### a) Sistema analógico

Segundo MIKHAIL (1989), nestes sistemas a condição de colinearidade é simulada por traçadores mecânicos, ópticos e óptico-mecânicos. Estes traçadores utilizam duas fotografias do mesmo objeto tomadas de posições distintas tendo uma área de superposição, permitindo montar o par estereoscópico do objeto. Os parâmetros que representam a localização ( $X^0, Y^0$  e  $Z^0$ ) e orientação das duas câmaras no instante da tomada das fotos ( $\kappa, \phi$  e  $\omega$ ) são recuperados em duas fases, orientação relativa e orientação absoluta. Na primeira fase, ocorre a reconstituição dos feixes que deram origem às imagens formando um modelo com escala e orientação arbitrários. Na segunda fase, o modelo é nivelado e colocado em escala para que as medidas efetuadas no modelo correspondam às medidas do objeto real. A saída destes instrumentos são, geralmente, plantas, mapas e desenhos representando o objeto em uma forma gráfica.

O uso de sistema analógico para redução de fotografias provenientes de câmaras não métricas não é muito recomendado devido a baixa precisão. A ausência das marcas fiduciais e a indefinição do ponto principal nestas fotografias são os principais limitantes para uso em tal sistema.

#### b) Sistema analítico

Ainda pelo mesmo autor, nos sistemas analíticos as transformações de coordenadas do espaço imagem em coordenadas do espaço objeto e vice-versa são realizadas através de relações matemáticas de modo *on-line* ou *off-line* nos chamados traçadores analíticos. Num traçador analítico tem-se um computador digital fazendo parte do sistema. Os parâmetros que

representam a localização e orientação das duas câmaras no instante da tomada das fotos são obtidos analiticamente. Os traçadores analíticos introduzem uma grande flexibilidade quando comparados com os traçadores analógicos. Os produtos de um sistema analítico tanto podem ser analógicos quanto digitais, assim, as estações fotogramétricas podem tornar-se um importante subsistema dentro de um sistema geral CAD/CAM. Os sistemas analíticos que trabalham no modo on-line permitem o uso de pares de fotos, enquanto que no modo *off-line* pode ser feita a redução de múltiplas fotografias do mesmo objeto. O recobrimento por múltiplas fotografias permite levantar um grande número de pontos do mesmo objeto, os quais serão posteriormente calculados por rigorosos programas que empregam o uso do método dos mínimos quadrados para a estimação das suas posições. Em geral, um grande número de interseções de raios para um único ponto permitem obter sua localização com alta precisão. Nas reduções dos dados, os modelos matemáticos podem ser ampliados para incluírem a autocalibração, onde várias características sistemáticas do sistema da câmara podem ser descritas matematicamente por um conjunto de parâmetros adicionais, os quais poderão ser estimados.

### c) Sistema digital

Num sistema digital tem-se como componente básico o computador digital. Todo o processamento é feito pelo sistema. A orientação do modelo ou de uma única foto continua sendo calculada de forma analítica como no sistema analítico, mas, a diferença básica está na natureza das fotografias utilizadas. A principal característica de um sistema digital é a natureza discreta dos dados, isto é, a forma como são apresentadas as imagens. Enquanto que nos sistemas analógicos e analíticos tem-se a fotografia analógica, nos sistemas digitais estas apresentam-se como um conjunto de elementos pictóricos, onde cada um possui um valor de brilho ou atributo associado à resposta espectral da cena imageada. Tais imagens são obtidas por câmaras digitais ou por processo de digitalização de fotografias analógicas. Nestes sistemas muitas operações de processamento de imagens podem ser empregadas para melhorar a qualidade visual da imagem para um dado objetivo, ou para extrair automaticamente dados a partir delas. Por exemplo, o método para extrair a posição precisa de um alvo numa imagem digital é um tipo de operação de processamento de imagem. A correlação digital de duas ou mais imagens de um mesmo objeto é outro tipo de operação de

processamento de imagem. Os resultados destas operações são também digitais e eles são facilmente armazenados ou recuperados para posterior processamentos (MIKHAIL, 1989).

Os sistemas digitais, quando comparados aos demais sistemas, permitem uma flexibilidade bem maior em termos de técnica de redução de dados e de processamento (WALDHÄUSL, 1992; Astori B. et al., 1992; STREILEIN, BEYER e KERSTEN, 1992).

## 2.2.2. Problemas na aquisição de dados

A fotografia é uma representação bidimensional do espaço objeto. Pode-se considerar a câmara como o instrumento que faz essa transformação (SCHOWENGERDT, 1988). Desta forma, as imperfeições neste sistema influenciarão na imagem.

As imagens obtidas, sejam elas analógicas ou digitais, apresentam erros randômicos e sistemáticos. Uma vez conhecida a origem dos erros sistemáticos pode-se minimizar os seus efeitos através de modelos matemáticos que os modelem.

Segundo MCGLONE (1989), é necessário, antes da redução dos dados, as correções dos erros sistemáticos que são produzidos pelos equipamentos de medições de fotocoordenadas (comparadores), pelas distorções de imagem e pela refração atmosférica. Para DALMOLIN et al (1998), quando a imagem é obtida via digitalização de fotografias deve-se levar em consideração os erros provocado pelo *scanner*, assunto este, fora do escopo desta pesquisa.

### 2.2.2.1. Comparadores

Todos os comparadores, mecânicos, óptico-mecânico ou digitais, apresentam erros nas leituras de coordenadas ou fotocoordenadas. Por exemplo, a não ortogonalidade e mudança de escala ao longo dos eixos, efeito da temperatura e outros fatores afetam as mediadas. Esses erros podem ser determinados por medições e consequentemente modelados fornecendo uma equação de correção para as futuras medidas (MCGLONE, 1989).

Ainda pelo mesmo autor, a equação de correção pode ser implementada de muitas formas ( como uma equação polinomial, uma série de Fourier ou uma *look-up table*). Uma das formas mais usada é o uso da equação polinomial e da transformação afim aplicada em dois estágios. Em primeiro lugar tem-se a remoção dos erros lineares com a transformação afim e por fim a remoção de erros não lineares por uma equação polinomial.

Os parâmetros das equações são estimados através do método dos mínimos quadrados (MMQ). Os dados para a solução podem ser obtidos num procedimento destinado a eliminar possíveis desvios de medidas, desde que a magnitude do erro envolvido esteja dentro do intervalo de tolerância. Os pontos da malha devem ser medidos várias e em plano rotacionado de 90° entre as medidas de forma que o próprio processo de medição não introduza nenhum erro sistemático.

Uma outra forma para modelar o erro do comparador é mostrada por DAL POZ (1989) e SILVA (1995):

$$\begin{aligned} dx &= A \times (y'_p - y_0) \\ dy &= B \times (y'_p - y_0) \end{aligned} \quad (20)$$

onde:

$dx$  e  $dy$  : são as componentes devido à falta de ortogonalidade e diferença de escala entre os eixos  $X'$  e  $Y'$  do instrumento de medição;

$y'_p$  : ordenada medida referida ao sistema não retangular e;

$y_0$  : ordenada do ponto principal medida no sistema não retangular e;

$A, B$ : parâmetros de calibração.

#### 2.2.2.2 Deformação da imagem

A deformação da imagem se refere ao deslocamento do ponto imagem em relação à sua posição ideal. Esta deformação pode ser causada tanto por movimentos físicos dos filmes (trabalho do filme), por distorções nas lentes e pela refração atmosférica (FRYER e DONNELLY, 1989).



#### 2.2.2.2.1. Refração atmosférica

A trajetória de um raio de luz sofre continuamente um desvio devido às variações do índice de refração.

Neste trabalho, a refração atmosférica não é considerada em virtude da proximidade da câmara em relação ao objeto.

#### 2.2.2.2.2. Trabalho do Filme

O modelo matemático clássico da fotogrametria analítica está baseada em duas concepções. Primeiro, o objeto, o centro perspectivo e o ponto imagem encontram-se numa mesma linha reta. Segundo, os pontos imagem são coplanares, ou seja, pertencem ao plano do filme. Para FRYER e DONNELLY (1989) a concepção de coplanaridade não é válida se o filme não estiver planificado no momento da exposição. Segundo OLIVAS (1980), a condição de colinearidade é falsa se o filme apresentar deformações devido às variações ambientais (temperatura e umidade, etc.).

Segundo ANDRADE e OLIVAS (1981), o trabalho do filme devido às mudanças ambientais pode ser modelado se a câmara possuir marcas fiduciais ou *reseau*, neste caso uma transformação afim geral pode ser aplicada com sucesso. De acordo com LUGNANI (1987), para câmaras que possuem oito marcas fiduciais recomenda-se a transformação projetiva no plano. Quando a câmara possui oito ou mais marcas fiduciais tem sido recomendado a utilização da transformação polinomial de 2<sup>o</sup> e 3<sup>o</sup> grau (Merchant apud MITSHITA, 1997).

Para MITSHITA (1997), a transformação afim geral no plano tem sido vastamente utilizada em vários sistemas fotogramétricos analíticos. Este fato, é proveniente das facilidades computacionais existentes com a implementação deste tipo de modelo, como também pela maior abrangência de qualquer tipo de câmara.

A transformação afim geral no plano contém seis parâmetros: dois de escalas, dois de translação, um de não ortogonalidade dos eixos e um de rotação. Pode-se expressá-la da seguinte forma :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x'_0 \\ y'_0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

onde :

$x'$  e  $y'$  : coordenadas da marcas fiduciais observadas;

$x$  e  $y$  : coordenadas das marcas fiduciais calibradas;

$a_{ij}$  : são os parâmetros de rotação, escala e não ortogonalidade;

$x'_0$  e  $y'_0$  : são parâmetros de translação;

Como pode ser observado na equação 21, deseja-se calcular seis parâmetros. Sendo que cada ponto fiducial ou ponto *reseau* fornece duas equações. Assim, com apenas três marcas fiduciais calibradas ou três pontos *reseau* calibrados nos dois espaços seria possível resolver o sistema. Entretanto, é aconselhável utilizar um número de pontos superior a 3 e encontrar os mesmos por meio do método dos mínimos quadrados (LUGNANI, 1987).

Embora as câmaras não métricas possuam várias características que as tornam menos acuradas que as câmaras métricas, sua principal característica limitante é a falta de um mecanismo de sucção para garantir a planificação do filme durante a exposição (FRYER e DONNELLY, 1989).

#### 2.2.2.2.3 Distorções das Lentes

Distorção de lentes pode ser entendida como o desvio entre a imagem de um ponto objeto e a sua posição teórica prevista pela condição de colinearidade. Estas distorções tem duas causas. A primeira é conceitual, uma vez que o imageamento geométrico perfeito só pode ser obtido para um único ponto objeto e para um único ponto imagem, lentes não podem ser projetadas para ter um imageamento geométrico perfeito sob todos os campos de visada e variação de foco. A fim de simplificar a análise de lentes, o comportamento perfeito é assumido e os desvios a partir deste comportamento são tratados como distorções a serem corrigidas. A segunda causa da distorção das lentes é devido a erros na fabricação destas. Algumas imperfeições no polimento das lentes ou em sua montagem resultarão no

imageamento geométrico impróprio, os quais deverão ser compensados (MACGLONE, 1989; LUGNANI, 1987 e BROWN, 1966).

Distorção de lentes são usualmente divididas em dois tipos: radial simétrica e descentrada. Como o próprio nome implica, distorção radial simétrica afeta a posição do ponto imagem numa linha reta a partir do ponto principal da câmara no sentido radial. Segundo GALO (1993), a distorção radial simétrica pode ser considerada como uma parcela da refração sofrida pelo raio de luz desde o ponto objeto até o ponto imagem.

Distorção descentrada, causada pelo não alinhamento do eixo ótico na montagem das lentes, tem componentes radial e tangencial.

Enquanto a distorção das lentes é fato tanto na fotogrametria topográfica como na não topográfica, um outro fator que agrava nos trabalhos desta última é a variação da distorção das lentes em função da variação da distância câmara-objeto. Esta variação é uma função do plano de melhor focalização do objeto de interesse dentro da profundidade de campo (MCGLONE, 1989).

#### a) Distorção radial simétrica das lentes

A distorção radial das lentes ( $\delta_r$ ) para uma lente com foco no infinito, pode ser escrita como uma função da distância radial ( $r$ ) (MCGLONE, 1989):

$$\delta r = K_1 \cdot r^3 + K_2 \cdot r^5 + K_3 \cdot r^7 + \dots \quad (22)$$

onde :

$K_1, K_2, K_3, \dots$  são coeficientes polinomiais.

A distância radial é dada por:

$$r = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]^{1/2} \quad (23)$$

onde:

$x, y$  - coordenadas no sistema fiducial;

$x_0, y_0$  - coordenadas do ponto principal no sistema fiducial.

Pode-se calcular as componentes da distorção radial simétrica no sistema de coordenadas fotogramétricas com auxílio da figura 12 (WOLF, 1974).

da figura 12 tem :

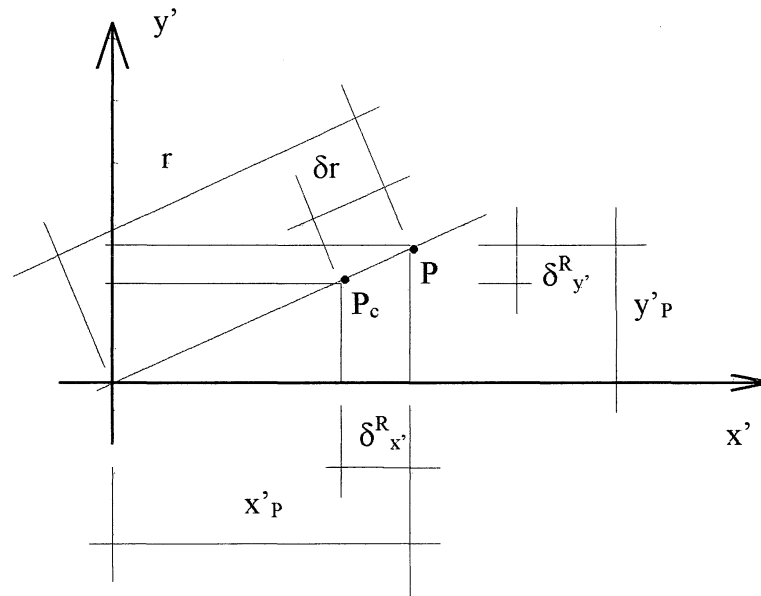
$$\frac{x'}{r} = \frac{\delta_{x'}^R}{\delta r} \rightarrow \delta_{x'}^R = \frac{x'}{r} \cdot \delta r$$

e

$$\frac{y'}{r} = \frac{\delta_{y'}^R}{\delta r} \rightarrow \delta_{y'}^R = \frac{y'}{r} \cdot \delta r$$

(24)

FIGURA 12: Componentes da distorção radial.



Fonte WOLF (1974).

onde substituindo (22) em (24) tem-se:

$$\delta_{x'}^R = \frac{x'}{r} \cdot (K_1 \cdot r^3 + K_2 \cdot r^5 + K_3 \cdot r^7)$$

$$\delta_{x'}^R = x' \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6) \quad (25)$$

$$\delta_{y'}^R = \frac{y'}{r} \cdot (K_1 \cdot r^3 + K_2 \cdot r^5 + K_3 \cdot r^7)$$

$$\delta_{y'}^R = y' \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6) \quad (26)$$

onde

 $\delta_{x'}^R$  e  $\delta_{y'}^R$  : componentes da distorção radial simétrica em  $x'$  e  $y'$  respectivamente;

$x'$  e  $y'$  : coordenadas do ponto imagem no sistema com origem no ponto principal,  
sendo obtidas por:

$$x' = (x - x_0) \quad \text{e} \quad y = (y - y_0) \quad (27)$$

Para objetos focalizados entre duas distâncias para as quais a câmara foi calibrada, a distorção radial muda de forma previsível. A distorção radial também varia para um foco particular tomado dentro do campo de profundidade, isto é, dentro de uma variação da distância da câmara para o objeto a qual fornece um foco nítido (FRYER, KNIEST e DONNELLY, 1990).

Se a distorção ,  $\delta r_{S_1}$  e  $\delta r_{S_2}$  , para duas distâncias de focos diferentes,  $S_1$  e  $S_2$  , são conhecidas (Fig. 13), então a distorção para uma outra distância de foco  $S$  pode ser calculada usando a seguinte fórmula (BROWN, 1971):

$$\delta r_{S_1} = K_{1S_1} \cdot r^3 + K_{2S_1} \cdot r^5 + K_{3S_1} \cdot r^7 + \dots \quad (28)$$

$$\delta r_{S_2} = K_{1S_2} \cdot r^3 + K_{2S_2} \cdot r^5 + K_{3S_2} \cdot r^7 + \dots \quad (29)$$

$$\alpha_s = \frac{(S_2 - S)}{(S_2 - S_1)} \cdot \frac{(S_1 - f)}{(S - f)} \quad (30)$$

$$\delta r_S = K_{1S} \cdot r^3 + K_{2S} \cdot r^5 + K_{3S} \cdot r^7 + \dots \quad (31)$$

$$\begin{cases} K_{1S} = \alpha_s \cdot K_{1S_1} + (1 - \alpha_s) \cdot K_{1S_2} \\ K_{2S} = \alpha_s \cdot K_{2S_1} + (1 - \alpha_s) \cdot K_{2S_2} \\ K_{3S} = \alpha_s \cdot K_{3S_1} + (1 - \alpha_s) \cdot K_{3S_2} \end{cases} \quad (32)$$

onde

$\alpha_s$  : é um coeficiente de proporcionalidade;

$f$  : é a distância focal das lentes;

Pode-se notar que as equações 28 a 32 são válidas somente para pontos no plano na qual a lente está atualmente focalizada. A distorção de pontos a outras distâncias dentro da profundidade de campo deve ser calculada usando as seguintes expressões (BROWN, 1971)(Fig. 14). Se  $\delta_{S,S'}$  é a distorção para um ponto a distância  $S'$ , quando a lente é focalizada a distância  $S$ , a distorção é dada por:

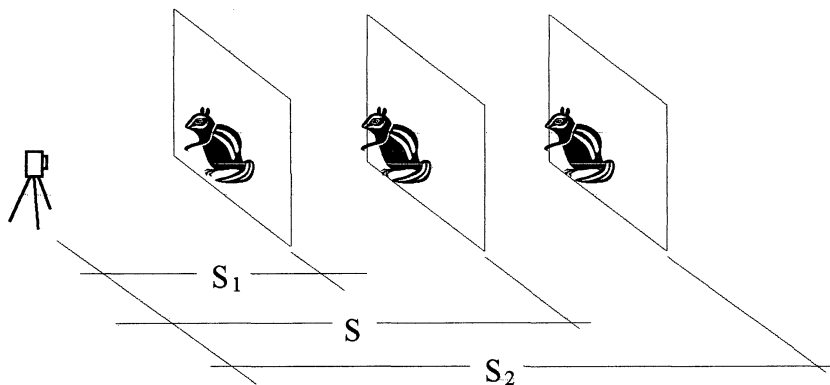
$$\begin{cases} \delta_{s,s'} = \gamma_{s,s'}^2 \cdot K_{1s'} \cdot r^3 + \gamma_{s,s'}^4 \cdot K_{2s'} \cdot r^5 + \gamma_{s,s'}^6 \cdot K_{3s'} \cdot r^7 + \dots \\ \gamma_{s,s'} = \frac{(S-f)}{(S'-f)} \cdot \frac{S'}{S} \end{cases} \quad (33) \text{ e } (34)$$

cujas componentes nos sistema com origem no ponto principal pode ser calculada por :

$$\delta_x^R = \frac{x'}{r} \cdot \delta r_{s,s'} \quad \text{e} \quad \delta_y^R = \frac{y'}{r} \cdot \delta r_{s,s'} \quad (35) \text{ e } (36)$$

Segundo MCGLONE (1989), a equação 33 para  $K_{1s}$  ,  $K_{2s}$  e  $K_{3s}$  , são formas aproximadas (válidas para S muito maior do que f).

FIGURA 13 : Variação da distorção radial em função da distância objeto-câmara.



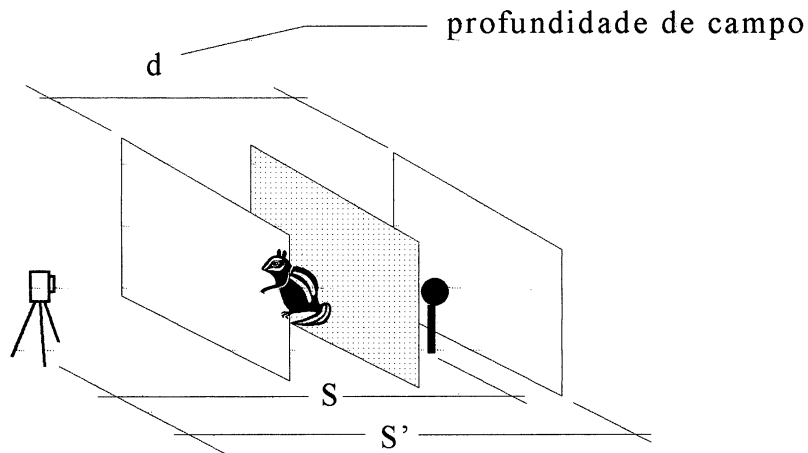
Fonte: Adaptado de MACGLONE (1989).

As distorções a serem determinadas dependem da distância para qual a câmara foi calibrada (  $S_1$  ou  $S_2$  ), bem como da distância da câmara aos pontos em tratamento em (S). Desde que as coordenadas dos pontos em (S) não serão conhecidas até que a solução seja obtida, as correções das distorções das lentes serão efetuadas iterativamente. O procedimento é o seguinte (BROWN, 1971 e MCGLONE, 1989):

1. Coordenadas aproximadas do ponto são calculadas usando coordenadas imagens não corrigidas das distorções das lentes, ou não corrigidas para a distância focal das lentes.
2. Usando coordenadas aproximadas, o valor de  $S'$  é calculado e usado para obter o coeficiente  $\alpha$  e então os coeficientes  $K_{1s}$  ,  $K_{2s}$  e  $K_{3s}$  .

- 3  $\gamma_{S,S'}$  é calculado juntamente com os coeficientes  $K_{1S'}$ ,  $K_{2S'}$  e  $K_{3S'}$ , o qual segue  $\delta_{S,S'}$  para ser calculado.
- 4 As coordenadas imagens podem agora ser corrigidas, e o processo é repetido até que as correções sejam insignificantes dentro de um critério estabelecido pelo usuário.

FIGURA 14 : Variação da distorção radial em função da variação do ponto dentro do campo de profundidade



#### b) Distorção descentrada

Da impossibilidade do fabricante em alinhar perfeitamente os eixos ópticos das lentes que compõem uma objetiva, resultam deslocamentos da imagem. Trata-se da distorção descentrada. Esta é composta pelas distorções tangencial e radial assimétrica (ver figura 15) (OLIVAS, 1980).

O modelo mais aceito para a distorção descentrada é dado por BROWN (1966), onde as componentes radial assimétricas e tangencial são :

$$\delta_r^D = 3 \cdot P \cdot \sin(\phi - \phi_0) \quad (37)$$

$$\delta_t^D = P \cdot \sin(\phi - \phi_0) \quad (38)$$

onde

$\delta_r^D$  : componente radial da distorção descentrada;

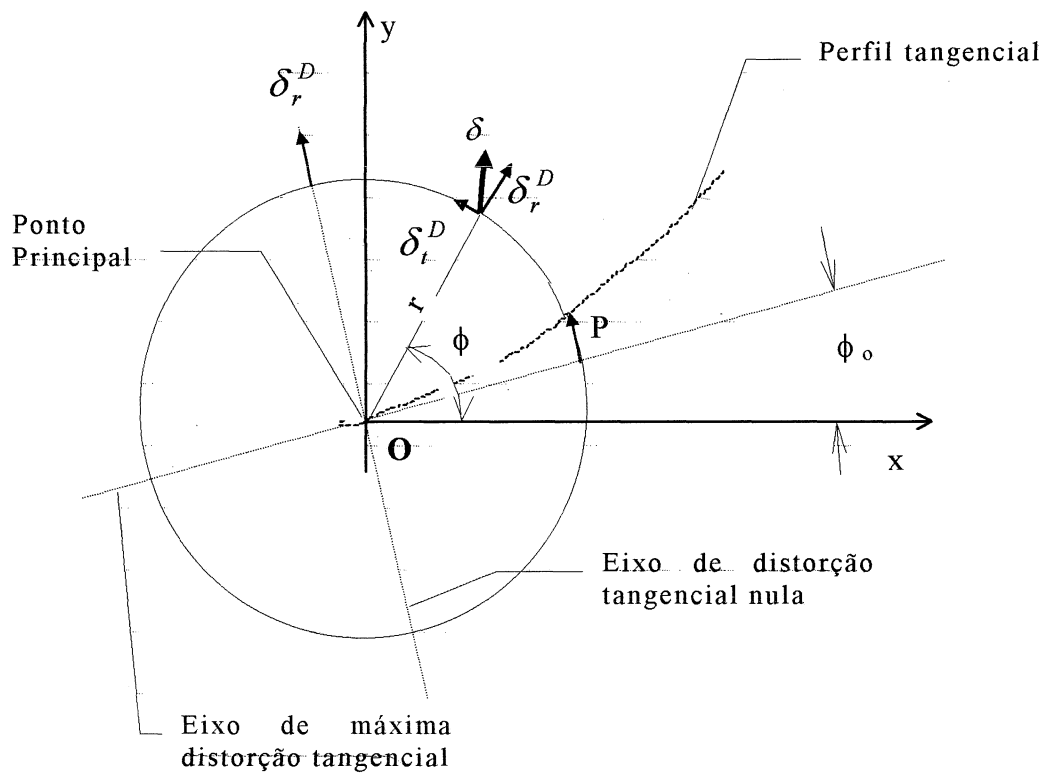
$\delta_t^D$  : componente tangencial da distorção descentrada;

$P$  : corresponde a distância entre o perfil tangencial e o eixo de máxima distorção tangencial, tomado a distância  $r$ ;

$\phi$  : é o ângulo, contado no sentido anti-horário, entre a linha a partir do ponto principal para o ponto de interesse e o eixo  $x$ ;

$\phi_0$  : é o ângulo, contado no sentido anti-horário, entre o eixo de máxima distorção tangencial e o eixo  $x$ .

FIGURA 15 : Parâmetros que determinam o valor da distorção descentrada de lentes.



Fonte: adaptado de BROWN (1966).

As expressões (37) e (38) podem ser modificadas para dar as componentes da distorção descentrada como segue:

$$\delta_x^D = [P_1 \cdot (r^2 + 2x'^2) + 2P_2 \cdot x' \cdot y'] \cdot [1 + P_3 \cdot r^2 + P_4 \cdot r^4 + \dots] \quad (39)$$

$$\delta_y^D = [P_2 \cdot (r^2 + 2y'^2) + 2P_1 \cdot x' \cdot y'] \cdot [1 + P_3 \cdot r^2 + P_4 \cdot r^4 + \dots] \quad (40)$$



onde:

$P_1, P_2, \dots$  : são coeficientes polinomiais;

$r$  : é a distância radial.

Segundo GALO (1993), na aplicação das equações (39) e (40), para a correção da distorção descentrada em câmaras métricas convencionais, os termos  $P_3$  e superiores são desprezados, devido a sua pequena influência.

Assim as equações são simplificadas para:

$$\delta_x^D = \left[ P_1 \cdot (r^2 + 2x'^2) + 2P_2 \cdot x' \cdot y' \right] \quad (41)$$

$$\delta_y^D = \left[ P_2 \cdot (r^2 + 2y'^2) + 2P_1 \cdot x' \cdot y' \right] \quad (42)$$

As investigações mais recentes mostram que a distorção descentrada também varia com a focalização. Se o valor da distorção descentrada com foco no infinito é escolhido como padrão, as expressões para distorção descentrada de um ponto imagem pode ser representada de forma geral por (MCGLONE, 1989) :

$$\Delta_{xS}^D = \left( 1 - \frac{f}{S} \right) \cdot \left[ P_1 \cdot (r^2 + 2x'^2) + 2P_2 \cdot x' \cdot y' \right] \quad (43)$$

$$\Delta_{yS}^D = \left( 1 - \frac{f}{S} \right) \cdot \left[ P_2 \cdot (r^2 + 2y'^2) + 2P_1 \cdot x' \cdot y' \right] \quad (44)$$

Este resultado é válido somente para pontos no plano de focalização à distância  $S$ . Assim como na distorção radial simétrica, uma modificação adicional é requerida para avaliar a variabilidade dentro do campo fotográfico. Isto é conseguido através da aplicação de um fator de escala  $\gamma_{S,S'}$  desenvolvido por BROWN (1971) e definido como:

$$\gamma_{S,S'} = \frac{(S-f)}{(S'-f)} \cdot \frac{S'}{S} \quad (45)$$

Para gerar a fórmula de distorção descentrada para um ponto a uma distância  $S'$ , uma única multiplicação deve ser efetuada no membro direito das equações (43) e (44) pelo fator  $\gamma_{S,S'}$ .

### 2.2.3 Técnicas Empregadas na Redução dos Dados em Fotogrametria a Curta Distância

As técnicas empregadas na redução e/ou processamento dos dados tanto na fotogrametria não topográfica como na topográfica são : Estereofotogrametria, Fotogrametria Bidimensional, Retificação Simples e Retificação Diferencial (GOMES et al., 1995).

De acordo com DAL POZ (1996), é possível implementar modelos matemáticos para monorestituição para efetuar reduções de dados em fotogrametria terrestre. Assim, pode-se incluir mais uma técnica nas citadas anteriormente, ou seja, a monorestituição.

#### 2.2.3.1 *Estereofotogrametria*

A estereofotogrametria é a técnica utilizada na construção, a partir de duas fotografias homólogas, de um modelo ótico tridimensional ou modelo estereoscópico, homotético direto da porção do objeto contido na área útil do estereograma formado pelas duas fotografias. Para tal, utiliza-se de aparelhos restituidores analógicos, analíticos ou digitais para reduzir os dados. Assim, todos os acidentes naturais ou artificiais serão projetados ortogonalmente sobre uma superfície plana, e o relevo será representado por curvas de nível.

#### 2.2.3.2 *Fotogrametria Bidimensional*

Nesta técnica são empregadas duas ou mais fotografias isoladas do mesmo objeto, tomadas de pontos de vista diferentes, e através de medições de coordenadas planas de pontos bem definidos nas imagens, via mesa digitalizadora, monocomparadores ou tela de vídeo,

obtem-se na tela do computador a representação gráfica do objeto fotografado e consequentemente, um arquivo magnético contendo as coordenadas planas (X,Y) dos pontos definidores do objeto (GOMES et al., 1995).

Alguns sistemas fotogramétricos que usam esta técnica permitem, após digitalização de todos os pontos do objeto em todas as fotos, a autocalibração e o ajustamento global dos dados utilizando modelos matemáticos adequados de forma a fornecer as coordenadas tridimensionais dos pontos do objeto (FELLBAUM, 1992).

#### 2.2.3.3 *Retificação Simples*

A retificação simples consiste na correção da escala e inclinação das fotografias obtidas por câmaras cujos eixos de tomada das estações estejam aproximadamente paralelas em relação ao objeto fotografado. Normalmente aplica-se a retificação simples a objetos planos, como por exemplo fachadas (NOVAK, 1992). No campo digital a retificação de imagens torna-se uma ferramenta muito promissora no levantamento de sítios e monumentos históricos, pois o produto final é uma planta-imagem ou um mapa-imagem (OGLEBY, 1995). O processamento da imagem digital para tal propósito consiste de duas fases : transformações através de técnicas paramétricas e não-paramétricas e a reamostragem dos valores de brilho dos *pixels* (PALLASKE, MARTEN e MAUELSHAGEN, 1994).

A retificação digital simples será tratada com mais ênfase no próximo capítulo.

#### 2.2.3.4 *Retificação Diferencial*

Nos sistemas analógicos, a retificação diferencial ou ortofotografia consiste na correção da escala e inclinação das fotografias e na transformação de uma das duas projeções centrais, que formam o modelo estereoscópico, em outra imagem fotográfica denominada ortofotografia, onde cada um dos detalhes que a forma, estão projetados ortogonalmente (GOMES et al., 1995).

Nos sistemas digitais, tem-se como produto da retificação diferencial a ortofoto digital que goza das mesmas propriedades das ortofotografias. O princípio da produção de ortofotos digitais consiste em transferir tons de cinza da fotografia aérea ou terrestre para uma malha fina e regular que representa a projeção ortogonal da cena imageada ou fotografada. (ALMEIDA, 1989).

Na retificação diferencial digital é necessário ter em mãos o modelo digital do terreno (MDT) para que os deslocamentos dos pontos objetos na imagem devido ao relevo possam ser corrigidos. A ligação entre o espaço imagem e o espaço objeto é feita pela equação de colinearidade simples ou modificada e o nível de cinza é interpolado usando métodos de reamostragem. O uso da equação de colinearidade exige o conhecimento prévio dos parâmetros de orientação exterior (uso da colinearidade simples) e interior (uso colinearidade modificada). Quando tais parâmetros não são conhecidos o uso das técnicas de fototriangulação com autocalibração permitem resgatá-los (NOVAK, 1992).

#### 2.2.3.5 Monorestituição

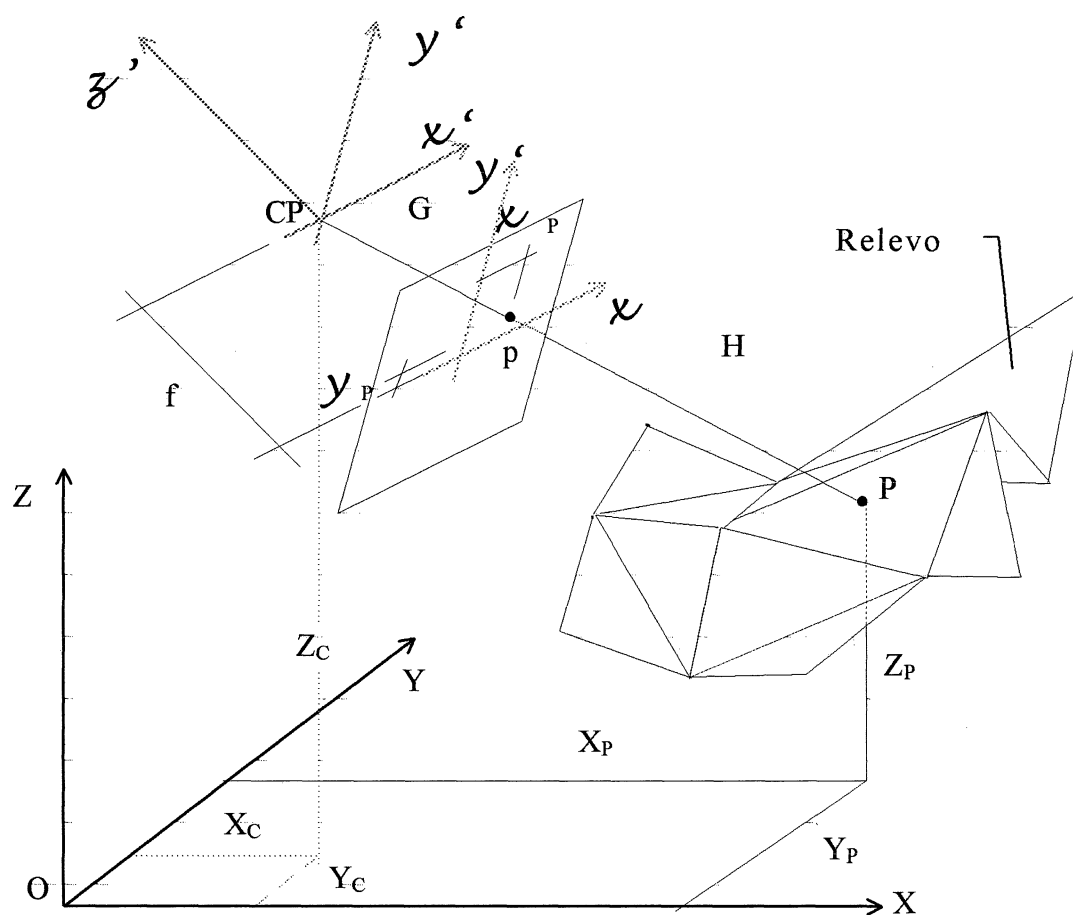
Segundo DAL POZ (1996) a monorestituição foi concebida por Makarovic em 1973, e consiste em determinar as coordenadas planas dos pontos do espaço objeto utilizando apenas uma fotografia, os seus parâmetros de orientação exterior e uma forma de representação do relevo fotografado.

A orientação interior sempre é necessária quando se utiliza de câmaras não métricas. Os parâmetros da orientação exterior podem ser obtidos por resseção espacial quando se faz uso de câmaras métricas ou semi-métricas, uma vez que estas trazem, muitas vezes, os parâmetros da orientação interior necessários para efetuar as devidas correções sistemáticas durante a redução dos dados. Se o equipamento utilizado é do tipo não métrico então o conhecimento dos parâmetros interiores, como também dos exteriores, podem ser obtidos via calibração de câmaras. Para o caso de câmaras não métricas a técnica de autocalibração é a mais recomendada.

O método proposto por Makarovic apud DAL POZ (1996), e adotado neste trabalho, tem por princípio a interseção da reta de colinearidade com um DTM da região fotografada, resultando numa solução iterativa.

O modelo de colinearidade pressupõe um modelo teórico baseado na projeção de perspectiva central, onde o centro perspectivo (CP), o ponto imagem (p) e seu correspondente ponto objeto (P) são colineares, como mostra a figura 16.

FIGURA 16 :Princípio de colinearidade.



Fonte: adaptado de LUGNANI (1987)

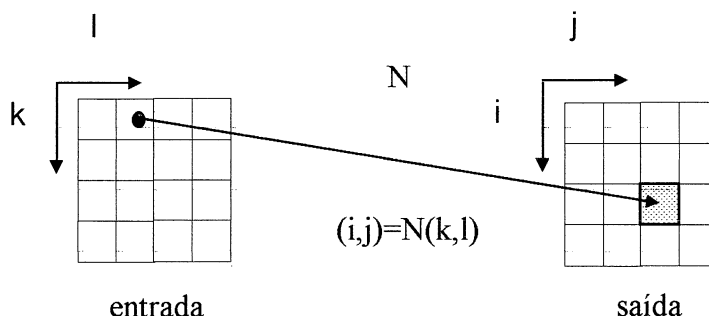
## 2.3 - MÉTODOS PARA RETIFICAÇÃO DIGITAL E MONORESTITUIÇÃO

Segundo ALMEIDA (1989) as fotografias apresentam deslocamentos motivados pela inclinação da câmara e também pelo relevo da região fotografada. Ainda pelo mesmo autor, a retificação de fotografias consiste em transformar fotos inclinadas em verticais, entretanto, estas ainda apresentam deslocamentos devido ao relevo mas que podem também ser removidos pela retificação diferencial. Assim, tem-se duas maneiras de efetuar a retificação : uma onde apenas os efeitos da inclinação da fotos são tratados e outra onde tanto o efeito da inclinação da foto quando o deslocamento devido ao relevo são levados em consideração. No primeiro caso diz-se que a retificação é simples. As imagens digitais, provenientes de câmaras CCD's ou da digitalização de fotografias possuem a mesma geometria, e por tal apresentam os mesmos efeitos, ou seja distorção devido a inclinação e ao relevo. Assim, a retificação digital consiste em corrigir esses efeitos sobre uma imagem.

De acordo com NILBLAC (1986), a imagem a ser modificada é chamada imagem de entrada e a que será gerada, imagem corrigida ou imagem de saída. Quando a transformação visa alinhar a imagem de entrada com outra imagem, esta última é chamada imagem de referência. Em ambos os casos, são necessários dois passos para efetuar a transformação. Deve-se especificar inicialmente a transformação ou deformação, isto é normalmente feito especificando-se a transformação ou o modelo matemático que define a relação entre as coordenadas linha e coluna  $(i,j)$  na imagem de saída e as coordenadas  $(k,l)$  na imagem de entrada. A seguir, usando o modelo matemático, gera-se a imagem de saída a partir da imagem de entrada. Esta segunda etapa envolve a reamostragem da imagem de entrada.

A figura 17 mostra à esquerda, a imagem de entrada e, à direita, a imagem de saída. Supondo que seja conhecido o modelo matemático  $N$  que relaciona coordenadas de entrada às coordenadas de saída, representado por  $(i,j) = N(k,l)$ , pode-se ver que os *pixels* da imagem de entrada serão "transferidos" para a imagem de saída. Isto é, cada posição  $(k,l)$  dos *pixels* de entrada serão mapeados através de  $N(k,l)$  para a posição  $(i,j)$  na imagem de saída. O valor de brilho (VB) do *pixel* de entrada em  $(k,l)$  é atribuído ao *pixel* de saída em  $(i,j)$ , obtendo-se a imagem desejada.

FIGURA 17 : Representação do mapeamento entre uma imagem de entrada e saída.



Fonte : NIBLACK (1986)

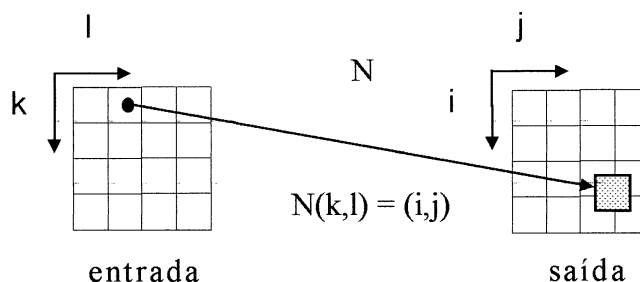
A transferência dos valores de brilho dos *pixels* mapeados entre as duas imagens podem ser feitos por dois métodos: o método direto e o método indireto.

### 2.3.1 Método direto

No método direto, cada *pixels* da imagem de entrada será "transferido" para a imagem de saída, isto é, cada posição  $(k,l)$  dos *pixels* de entrada serão mapeados através de  $N(k,l)$  para a posição  $(i,j)$  na imagem de saída. O VB do *pixel* de entrada em  $(k,l)$  é atribuído ao *pixel* de saída em  $(i,j)$ , obtendo-se a imagem desejada (Fig. 18).

No mapeamento direto resultará um "buraco" na imagem sempre que existir um *pixel* de saída para o qual não seja mapeado um *pixel* da imagem de entrada. Um segundo problema se verifica quando vários *pixels* de entrada são mapeados para um único *pixel* de saída. Ou se aceita simplesmente, ou deve-se determinar algum método que permita combinar/ponderar os *pixels* de saída. Outro problema é que os *pixels* de entrada podem ser mapeados para posições não inteiras na imagem de saída. Neste caso, deve-se determinar um método para calcular o valor para as posições inteiras, isto é, o valor do *pixel* de saída. Usualmente, as coordenadas para as quais os *pixels* de entrada são mapeados são arredondados para posições inteiras (NOVAK, 1992; ALMEIDA, 1989).

FIGURA 18 : Mapeamento direto.

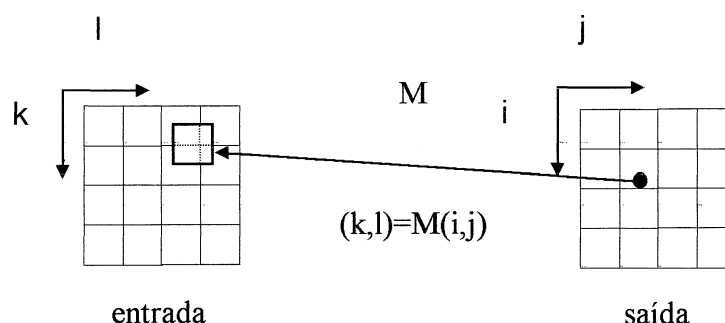


Fonte : NIBLACK (1986 )

### 2.3.2 Método indireto

Para evitar os problemas que ocorrem no mapeamento direto, coloca-se como alternativa a utilização do mapeamento inverso. Na figura 19 , a transformação ou modelo matemático  $M$  é o mapeamento inverso que leva  $(i,j)$  para  $(k,l)$ . Se este mapeamento puder ser deduzido, a imagem de saída poderá ser gerada da maneira descrita. Calcula-se através de  $M(i,j)$ , para cada posição  $(i,j)$  dos *pixels* de saída, a posição correspondente  $(k,l)$  na imagem de entrada, e nesta posição, toma-se o VB do *pixel*, atribuindo este valor ao *pixel* de saída  $(i,j)$ . Quando tiver sido atribuído um VB para todos os *pixels*  $(i,j)$ , a imagem de saída estará completa.

FIGURA 19 : Mapeamento indireto.



Fonte : NIBLACK (1986)

Esta atribuição de VB é a reamostragem, a qual envolve uma técnica de interpolação de tom de cinza. Usando o mapeamento inverso, pode-se evitar os problemas do mapeamento

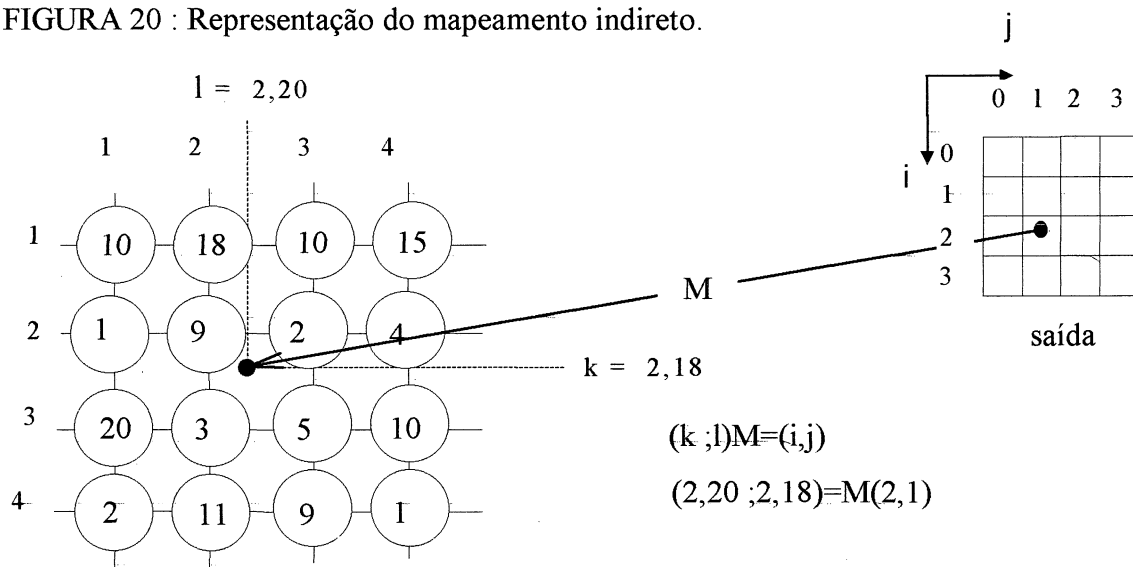


direto, sendo o método usado com mais frequência (NIBLACK, 1986; ALMEIDA, 1989) e como tal será usado neste trabalho.

### 2.3.3 Reamostragem ou interpolação de tom de cinza

Como foi dito anteriormente, o método indireto será empregado neste trabalho, e desta forma os *pixels* transformados deverão ter seus tons de cinza reamostrados, pois, para cada *pixel* (i,j) na imagem de saída o seu correspondente na imagem de entrada terá coordenadas não inteiras, como mostra a figura 20.

FIGURA 20 : Representação do mapeamento indireto.



Fonte : Adaptado de JENSEN (1986).

Seja, por exemplo, o *pixel* (2,1) na imagem de saída e a transformação M. Calculados os devidos parâmetros de M, pode-se aplicar M ao *pixel* (2,1) e encontrar o *pixel* (2,20 ;2,18) mapeado. Desta forma, o valor de brilho a ser colocado na posição (2,1) da imagem de saída deverá ser determinado uma vez que a sua posição mapeada não corresponde a uma posição inteira, como pode ser observado na figura 19.

Segundo JENSEN (1986) existem três principais interpoladores para estimar nível de cinza, a saber : vizinho mais próximo, interpolador bilinear e convolução cúbica.

### a) Interpolação pelo vizinho mais próximo

Este interpolador também é conhecido como ordem zero, e o valor de brilho a ser transferido corresponde ao do *pixel* da imagem de entrada que estiver mais próximo do *pixel* transformado. Por exemplo, na figura 20, o *pixel* que se encontra mais próximo da posição (2,20 ;2,18) é o *pixel* (2;2) cujo valor de brilho (VB) é 9. Assim, na posição (2;1) da imagem de saída será colocado o valor de brilho 9 (TABELA 5).

TABELA 5 : Interpolação pelo vizinho mais próximo para a posição (2,20 ;2,18)

Localização do ponto de amostra		Valo de VB	D <sub>m</sub>
linha	coluna		
2	2	9	0,27
2	3	2	0,84
3	2	3	0,82
3	3	5	1,15
Coordenada Inicial = ( 2,1 )			
Coordenada Transformada = ( 2,20; 2,18)			

Onde D<sub>m</sub> corresponde a distância entre o *pixel* interpolado e seus vizinhos, o qual é obtido pela expressão do cálculo da distância euclidiana entre dois pontos.

Este procedimento não é ‘pesado’ computacionalmente, pois será apenas verificado em qual intervalo o *pixel* mapeado se encontra. Outro fator importante é que não se altera os valores de brilho da imagem de entrada durante a reamostragem. Tais características fazem com que esse interpolador tenha uma grande aceitação entre os usuários do geoprocessamento, pois, frequentemente, há poucas mudanças entre os valores de brilho que tornam possível fazer a discriminação entre um tipo ou outro de vegetação, ou uma borda associada com um alinhamento geológico, ou níveis de turbidez ou temperatura num lago (SCHOWENGERDT, 1983).

## b) Interpolação bilinear

Também é conhecida como de primeira ordem, e determina o VB da imagem de saída pela interpolação em duas direções ortogonais na imagem de entrada. Este algoritmo usa os quatros *pixels* mais próximos do *pixel* transformado. Basicamente, ele ajusta um plano para os quatro valores de brilhos destes respectivos *pixels* e calcula um novo valor de brilho baseado nas distâncias do ponto transformado em relação aos seus vizinhos. A equação que determina o novo VB é :

$$VB_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^4 \left( \frac{Z_m}{D_m^2} \right)}{\sum_{m=1}^4 \left( \frac{1}{D_m^2} \right)} \quad (46)$$

onde :

$VB_{ij}$  : valor de brilho interpolado para a linha i coluna j na imagem de saída;

$Z_m$  : valores de brilhos para os quatros pontos vizinhos;

$D_m^2$  : quadrado das distâncias entre o *pixel* transformado e os seus respectivos vizinhos.

Por exemplo, na figura 20, o VB para o *pixel* interpolado (2,20 ;2,18) será 8, como mostra a TABELA 6.

TABELA 6 : Interpolação bilinear para a posição (2,20 ;2,18)

Localização do ponto de amostra		Valo de VB	$D_m$	$D_m^2$	$Z/D_m^2$	$1/D_m^2$
linha	coluna					
2	2	9	0,27	0,07	124,31	13,81
2	3	2	0,84	0,71	2,81	1,40
3	2	3	0,82	0,67	4,46	1,49
3	3	5	1,15	1,31	3,81	0,76
					135,39	17,47
Coordenadas Iniciais = ( 2,1 )				$VB_{ij} = 7,75196048$		
Coordenadas Transformadas = ( 2,20; 2,18)				ou 8		

Em muitas circunstâncias, este método apresenta resultados parecidos com os filtros espaciais que amenizam os valores de brilho extremos de uma imagem. Quando o cálculo de VB não é ponderado, o efeito obtido na imagem é muito parecido com o filtro da média, o qual será tratado posteriormente.

Este interpolador requer uma demanda computacional maior do que o do vizinho mais próximo.

#### b) Convolução cúbica

O valor reamostrado por esse método é muito semelhante à interpolação bilinear, exceto pelo fato de que o peso dos 16 *pixels* vizinhos são levados em conta no cálculo do valor de brilho do *pixel* de saída. A equação que determina o novo VB é :

$$VB_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^{16} \left( \frac{Z_m}{D_m^2} \right)}{\sum_{m=1}^{16} \left( \frac{1}{D_m^2} \right)} \quad (47)$$

onde :

$VB_{ij}$  : valor de brilho interpolado para a linha i coluna j na imagem de saída;

$Z_m$  : valores de brilhos para os dezesseis pontos vizinhos;

$D_m^2$  : quadrado das distâncias entre o *pixel* transformado e os seus respectivos vizinhos.

Por exemplo, na figura 20, o VB para o *pixel* interpolado (2,20 ;2,18) será 8, como mostra a TABELA 7.

Os efeitos da reamostragem pela convolução cúbica é idêntico aos efeitos do interpolador bilinear. Quando não se pondera o VB, o efeito na imagem se assemelha aos filtros passa baixas.

A demanda computacional deste método é bem maior do que o do bilinear, e conseqüentemente do que o do vizinho mais próximo.

TABELA 7 : Convolução cúbica para a posição (2,20 ;2,18)

Localização do ponto de amostra		Valo de VB	$D_m$	$D_k^2$	$Z/D_m^2$	$1/D_k^2$
linha	coluna					
1	1	10	1,68	2,83	3,53	0,35
1	2	18	1,21	1,47	12,22	0,68
1	3	10	1,45	2,11	4,73	0,47
1	4	15	2,18	4,75	3,16	0,21
2	1	1	1,20	1,43	0,70	0,70
2	2	9	0,27	0,07	124,31	13,81
2	3	2	0,84	0,71	2,81	1,40
2	4	4	1,83	3,35	1,19	0,30
3	1	20	1,43	2,03	9,84	0,49
3	2	3	0,82	0,67	4,46	1,49
3	3	5	1,15	1,31	3,81	0,76
3	4	10	1,99	3,95	2,53	0,25
4	1	2	2,15	4,63	0,43	0,22
4	2	11	1,81	3,27	3,36	0,31
4	3	9	1,98	3,91	2,30	0,26
4	4	1	2,56	6,55	0,15	0,15
					179,54	21,85
Coordenada Inicial = ( 2,1 )			$VB_{ij} =$		8,2162058	
Coordenada Transformada = ( 2,20; 2,18)			ou		8	

#### 2.3.4 Transformações geométricas

As transformações geométricas, ou mais genericamente as relações geométricas, são instrumentos fundamentais de trabalho para o fotogrametrista e geodesta, pois, cada dia mais, os tratamentos matemáticos e computacionais, substituem atividades analógicas e gráficas convencionais (LUGNANI, 1987).

Para PALLASKE, MARTEN e MAUELSHAGEN (1994), as transformações entre os espaços, para gerar uma ortoimagem, podem ser feitas utilizando a transformação projetiva, equações multiquadráticas ou equações polinomiais, que são técnicas não paramétricas. A aproximação paramétrica é uma solução rigorosa e é utilizada quando se deseja precisão. Neste caso a equação de colinearidade com parametrização ou não pode ser utilizada para efetuar a transformação entre os espaços. Segundo NOVAK (1992), dentre muitas

aproximações disponíveis, a retificação polinomial e transformação projetiva são as mais comuns. Em todos os casos uma superabundância de pontos de controle, nos dois espaços, são requeridos e o cálculo dos parâmetros são obtidos pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). A escolha da técnica a ser utilizada depende, entre outras coisas, da estrutura e forma da superfície imageada, direção do eixo da câmara, distribuição e posição dos pontos de controle e demanda de precisão.

Neste trabalho será dado ênfase à transformação afim no plano, a equação de colinearidade parametrizada, a equação da DLT e a transformação projetiva numa tentativa de se estudar a aplicabilidade das mesmas na retificação digital.

#### 2.3.4.1 Transformação Afim no Plano

A transformação afim no plano pode ser representada pela seguinte forma matricial (LUGNANI, 1987):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (48)$$

onde :

$x'$  e  $y'$  : coordenadas de um ponto no espaço imagem;

$x$  e  $y$  : coordenadas do mesmo ponto no espaço objeto;

$a_{ij}$  : são os parâmetros de rotação, escala e afinidade;

$b_1$  e  $b_2$  : são parâmetros de translação;

Pode-se notar na equação (48) que, cada ponto obtido em ambos espaços, fornece duas equações, ou seja:

$$\begin{aligned} x' &= a_{11} x + a_{12} y + b_1 \\ y' &= a_{21} x + a_{22} y + b_2 \end{aligned} \quad (49)$$

Como são seis os parâmetros a serem determinados, há necessidade de no mínimo três pontos conhecidos nos dois espaços para encontrá-los (solução única).

Recomenda-se que o número de pontos conhecidos nos dois espaços seja superior a três, e uma vez que erros acidentais são inerentes às observações, o sistema de equações gerado será inconsistente, ou seja, as observações não serão compatíveis com o modelo matemático. Assim, para remover a inconsistência do sistema recorre-se ao ajustamento de observações pelo MMQ, que tem por objetivo obter uma solução única para o problema ( $V^T P V = \min$ ) e estimar a sua precisão (GEMAEL, 1995).

#### 2.3.4.2 Transformação Projetiva no Plano

A transformação projetiva no plano é dada pela seguinte equação (LUGNANI, 1987):

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_1 X + a_2 Y + a_3}{a_4 X + a_5 Y + 1} \\ y &= \frac{a_6 X + a_7 Y + a_8}{a_4 X + a_5 Y + 1} \end{aligned} \quad (50)$$

onde :

x e y : coordenadas de um ponto no espaço imagem;

X e Y : coordenadas do mesmo ponto no espaço objeto;

$a_i$  : são parâmetros;

Como são oito os parâmetros a serem determinados, há necessidade de no mínimo quatro pontos conhecidos nos dois espaços para encontrá-los (solução única), valendo a observação do item anterior.

### 2.3.4.3 Equação de Colinearidade Parametrizada

A equação de colinearidade, como já foi dito, é utilizada para se obter uma solução mais precisa. Segundo LUGNANI(1987) a equação de colinearidade não constitui uma transformação por não atender nem a definição de transformação e nem as propriedades da estrutura de grupo. A equação de colinearidade é tratada como uma relação geométrica.

A dedução do modelo matemático que relaciona o espaço objeto com o espaço imagem pode ser encontrada em LUGNANI (1987) e se apresenta na seguinte forma :

$$\begin{aligned} x' &= -f \cdot \frac{m_{11}(X - X^c) + m_{12}(Y - Y^c) + m_{13}(Z - Z^c)}{m_{31}(X - X^c) + m_{32}(Y - Y^c) + m_{33}(Z - Z^c)} \\ y' &= -f \cdot \frac{m_{21}(X - X^c) + m_{22}(Y - Y^c) + m_{23}(Z - Z^c)}{m_{31}(X - X^c) + m_{32}(Y - Y^c) + m_{33}(Z - Z^c)} \end{aligned} \quad (51)$$

onde :

$x'$  e  $y'$  : fotocoordenadas do espaço imagem para um ponto genérico, as quais são dadas pela equação 27;

$X, Y$  e  $Z$  : coordenadas do espaço objeto do ponto genérico;

$X^c, Y^c$  e  $Z^c$  : coordenadas do centro perspectivo;

$f$  : distância focal calibrada;

$m_{ij}$  : elementos da matriz de rotação.

Os valores dos elementos da matriz de rotação são dados por :

$$m_{11} = \cos \phi \cdot \cos \kappa$$

$$m_{12} = \sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \kappa$$

$$m_{13} = -\cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \cos \kappa + \sin \omega \cdot \sin \kappa$$

$$m_{21} = -\cos \phi \cdot \sin \kappa$$

$$m_{22} = -\sin \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa + \cos \omega \cdot \cos \kappa$$

$$m_{23} = \cos \omega \cdot \sin \phi \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \cos \kappa$$

$$m_{31} = \sin \phi$$

$$m_{32} = -\sin \omega \cdot \cos \phi$$

$$m_{33} = \cos \omega \cdot \cos \phi$$



onde :

$\kappa, \phi, \omega$  : ângulos de rotação.

Os ângulos de rotação  $\kappa$  (kapa),  $\phi$  (phy) e  $\omega$  (omega), permitem tornar o sistema de coordenadas do espaço objeto paralelo ao sistema fotogramétrico associado a imagem. Os ângulos correspondem a rotações em torno dos eixos Z, Y e X respectivamente.

Levando em consideração a influência dos erros sistemáticos, surge a equação de Colinearidade "Modificada" ou com parâmetros adicionais que se apresenta da seguinte forma

$$x - x_0 - \Delta x = -f \cdot \frac{m_{11}(X - X^c) + m_{12}(Y - Y^c) + m_{13}(Z - Z^c)}{m_{31}(X - X^c) + m_{32}(Y - Y^c) + m_{33}(Z - Z^c)} \quad (52)$$

$$y - y_0 - \Delta y = -f \cdot \frac{m_{21}(X - X^c) + m_{22}(Y - Y^c) + m_{23}(Z - Z^c)}{m_{31}(X - X^c) + m_{32}(Y - Y^c) + m_{33}(Z - Z^c)}$$

onde :

$x$  e  $y$  : fotocoordenadas ;

$x_0$  e  $y_0$  : fotocoordenadas do ponto principal;

$\Delta x$  e  $\Delta y$  : correções de erros sistemáticas;

A equação "inversa" é dada por :

$$X = X^c + (Z - Z^c) \cdot \frac{m_{11}\bar{x} + m_{21}\bar{y} + m_{31}\bar{z}}{m_{13}\bar{x} + m_{23}\bar{y} + m_{33}\bar{z}} \quad (53)$$

$$Y = Y^c + (Z - Z^c) \cdot \frac{m_{12}\bar{x} + m_{22}\bar{y} + m_{32}\bar{z}}{m_{13}\bar{x} + m_{23}\bar{y} + m_{33}\bar{z}}$$

onde :

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  : fotocoordenadas corrigidas dos erros sistemáticos;

$\bar{z}$  : distância focal ( $f$ ). Para o sistema do negativo tem-se  $\bar{z}$  positivo, o contrário tem-se  $\bar{z}$  negativo.

#### 2.3.4.4 Equação da DLT

A transformação linear direta (DLT) tem como conceito básico a transformação direta das coordenadas de comparador para coordenadas no espaço objeto, consequentemente eliminando os passos intermediários de transformação de coordenadas imagens do sistema do comparador para o sistema de foto (AMORIN e TOMMASELLI, 1989).

Segundo McGLONE (1989), e NAFTEL e BOOT (1991), uma derivação da DLT é dada usando a equação de colinearidade, na qual é incorporado uma transformação afim para transformar coordenadas do comparador para coordenadas de imagem. São também adicionados parâmetros para compensar os erros sistemáticos devidos às lentes. A equação é dada por :

$$L - \Delta_L = L_0 - f_L \cdot \frac{m_{11}(X - X^c) + m_{12}(Y - Y^c) + m_{13}(Z - Z^c)}{m_{31}(X - X^c) + m_{32}(Y - Y^c) + m_{33}(Z - Z^c)} \quad (54)$$

$$C - \Delta_C = C_0 - f_C \cdot \frac{m_{21}(X - X^c) + m_{22}(Y - Y^c) + m_{23}(Z - Z^c)}{m_{31}(X - X^c) + m_{32}(Y - Y^c) + m_{33}(Z - Z^c)}$$

onde :

L e C : coordenadas do ponto genérico no sistema do comparador;

L<sub>0</sub> e C<sub>0</sub> : são as coordenadas do ponto principal no sistema do comparador;

Δ<sub>L</sub> e Δ<sub>C</sub> : são os erros sistemáticos devido às distorções das lentes;

f<sub>L</sub> e f<sub>C</sub> : distâncias focais na direção de L e C.

A presença de duas distâncias focais é devido à transformação afim incorporada à equação de colinearidade .

Após as devidas manipulações algébricas pode-se representar a equação anterior da seguinte forma (ABDEL-AZIZ e KARARA, 1974) :

$$L - \Delta_L = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (55)$$

$$C - \Delta_C = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}$$

Onde:

$$\Delta_L = L'(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + \dots) + P_1(r_2 + 2L'^2) + 2P_2L'C'$$

$$\Delta_C = C'(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + \dots) + P_2(r_2 + 2C'^2) + 2P_1L'C'$$

$$r^2 = (L'^2 + C'^2);$$

$$L' = L - L_0;$$

$$C' = C - C_0;$$

$K_1, K_2$  e  $K_3$  : Coeficiente da distorção radial;

$P_1$  e  $P_2$  : Coeficiente da distorção descentrada;

$L_1$  até  $L_{11}$  : Os 11 parâmetros de transformação incógnitos;

$f_L$  e  $f_C$  : Distância focal nos eixos L e C respectivamente, onde:

$f_L = f/\lambda_L$  e  $f_C = f/\lambda_C \rightarrow \lambda_L$  e  $\lambda_C$  fator de escala nas direções L e C respectivamente.

Segundo os Estudos de ABDEL-AZIZ e KARARA (1974), pode-se desprezar os coeficientes  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $P_1$  e  $P_2$ , pois quando incorporados à equação não apresentam nenhuma alteração significativa. Logo:

$$\Delta_L = L'K_1r^2$$

$$\Delta_C = C'K_1r^2$$

A equação resultante pode ser resolvida tanto de forma direta ou iterativa. O forma direta obtém uma aproximação tão expressiva que as correções para as observações, as coordenadas de imagem, são tão pequenas que podem ser ignoradas. A forma linearizada da equação é dada por McGLONE (1989) :

$$\begin{aligned} L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4 - L_9XL - L_{10}YL - L_{11}ZL - (L - L_0)K_1'r^2 - L &= v_L \\ L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4 - L_9XC - L_{10}YC - L_{11}ZC - (C - C_0)K_1'r^2 - C &= v_C \end{aligned} \quad (56)$$

onde :

$$K_1' = K_1(L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1)$$

Para o caso de câmaras não calibradas existem somente nove parâmetros independentes. A DLT possui 11 parâmetros, incluindo dois que essencialmente modelam a deformação do filme. Se não existe deformação do filme, então duas equações de injunções

devem ser adicionadas para levantar a singularidade devido a redundância de parâmetros. Essa variação da DLT, na qual a solução é mais exata, foi desenvolvida por Bob e Krauss apud FAIG (1989). As injunções que permitem estimar melhor os parâmetros são :

$$\left(L_1^2 + L_2^2 + L_3^2\right) - \left(L_5^2 + L_6^2 + L_7^2\right) + \frac{C^2 - B^2}{D} = 0 \text{ e } A - \frac{B \cdot C}{D} = 0 \quad (57)$$

onde :

$$A = L_1 L_5 + L_2 L_6 + L_3 L_7;$$

$$B = L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11};$$

$$C = L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11}; \text{ e}$$

$$D = L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2;$$

Os parâmetros da câmara podem ser obtidos através dos 11 parâmetros da DLT, através da solução algébrica das equações geradas pelo próprio modelo, que resulta em :

$$L = -\frac{1}{\sqrt{(L_9 + L_{10} + L_{11})}}$$

$$L_0 = (L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11}) L^2 \quad (58)$$

$$C_0 = (L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11}) L^2 \quad (59)$$

$$f_L = \sqrt{(L_1^2 + L_2^2 + L_3^2) L - x_0^2} \quad (60)$$

$$f_C = \sqrt{(L_5^2 + L_6^2 + L_7^2) L - y_0^2} \quad (61)$$

$$\varphi = \sin^{-1}(L_9 L) \quad (62)$$

$$\varpi = \tan^{-1}\left(-\frac{L_{10}}{L_{11}}\right) \quad (63)$$

$$m_{11} = \frac{L(L_0 L_9 - L_1)}{f_x}$$

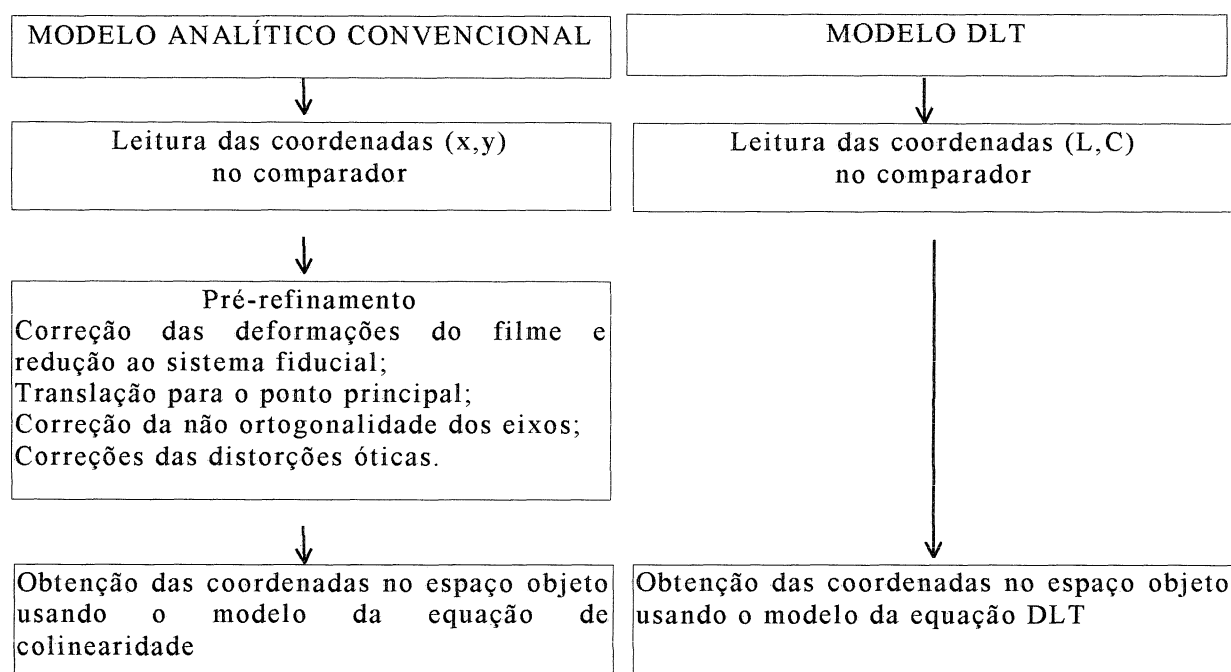
$$\kappa = \frac{\cos^{-1}(m_{11})}{\cos(\varphi)} \quad (64)$$

$$\begin{bmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} L_4 \\ L_8 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (65)$$

Considerando que cada ponto no espaço objeto (X,Y,Z) gera duas equações, e que o número de incógnitas a serem determinados são 12 ( 11 da DLT mais um que modela as distorções da lente), são necessários no mínimo seis pontos de controle para se obter a solução trivial (única).

A comparação entre a sequência de tratamento convencional utilizando a equação de colinearidade e do tratamento utilizando a DLT pode ser vista a seguir.

QUADRO 1 : Comparação entre a sequência de tratamento convencional e DLT



Fonte : AMORIN e TOMMASELLI (1989).

### 2.3.5 Cálculo dos parâmetros pelo MMQ

As considerações e desenvolvimentos tratados neste item podem ser encontradas em GEMAEL (1995) e SILVA(1995).

Considere por exemplo um sistema linear não homogêneo

$${}_nA_u X_1 = {}_nL_1 \quad (66)$$

onde há maior número de equações ( $n$ ) que incógnitas ( $u$ ). Como o vetor  $L$  contém erros de observações ele não será compatível com o modelo, então deve-se introduzir uma correção  $V$  sobre  $L$  para remover esta inconsistência e desta forma encontrar um estimador de  $X$ .

$$A\hat{X} = L_b + V \text{ ou } V = A\hat{X} - L_b \quad (67)$$

onde:

$L_b + V = L_a$  : vetor das observações ajustadas;

$L_b$  : vetor das observações;

$V$  : vetor dos resíduos;

$\hat{X}$  : estimador.

O Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) idealizado por Gauss e Legendre aceita como melhor estimador de  $X$  o valor que torna a soma dos quadrados dos resíduos mínima, ou seja,

$$V^T V = \min \quad (68)$$

Introduzindo a expressão (67) em (68) e encontrando o mínimo de sua função tem-se:

$$A^T A \hat{X} - A^T L_b = 0 \quad (69)$$

A equação (69) representa o conjunto das  $u$  equações normais a  $u$  incógnitas; quando a matriz  $A^T A$  é não singular, a solução (única) do sistema é dada por:

$$\hat{X} = (A^T A)^{-1} (A^T L_b) \quad (70)$$

As observações podem ser consideradas como uma amostra de um universo de média  $u$  e variância  $\sigma^2$ , cujos parâmetros amostrais estimados são :  $\hat{u}$  e  $\hat{\sigma}^2$ . O segundo parâmetro funciona como um indicativo de precisão das observações, o qual é muito útil no ajustamento

Admitindo que as mencionadas observações não ofereçam o mesmo grau de confiança, pode-se homogeneizá-las multiplicando-as por pesos, isto é, por valores tanto

maiores quanto maior a confiança que inspiram, ou seja, quanto menor for o valor de  $\hat{\sigma}^2$ , maior será o peso.

Designa-se por  $\Sigma_L$  a matriz variância-covariância do vetor das observações e por  $\sigma_0^2$  um fator de escala igual a variância da observação à qual foi atribuído peso unitário; dividindo  $\Sigma_L$  por  $\sigma_0^2$  obtém-se a matriz simétrica denominada matriz dos coeficientes de peso:

$$Q = 1/\sigma_0^2 \Sigma_L$$

Se a matriz  $Q$  for não singular admitirá uma inversa:

$$Q^{-1} = \sigma_0^2 \Sigma_L^{-1} = P \quad (71)$$

que recebe o nome de matriz dos pesos.

Então, a matriz dos pesos das observações fica determinada a partir do desvio padrão ( $\sigma_i$ ) de cada observação. Na hipótese de que as observações não sejam correlacionadas entre si a matriz  $P$  fica reduzida a uma matriz diagonal, cujos termos são  $\sigma_0^2/\sigma_i^2$ .

Mediante a consideração dos pesos o MMQ pode ser expresso de maneira mais geral por:

$$V^T P V = \min$$

onde,  $V^T P V$  é denominada de forma quadrática fundamental.

Desenvolvendo o mínimo da função obtém-se como solução, para o caso em que as equações de observações sejam lineares:

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} (A^T P L_b) \quad (72)$$

ou de forma mais compacta

$$\hat{X} = N^{-1} U \quad (73)$$

com  $N^{-1} = A^T P A$  e  $U = A^T P L_b$ .

Quando o modelo matemático usado não é linear, deve-se linearizá-lo em série de Taylor e desprezar os termos de segunda ordem e superiores. Desta forma, o MMQ será resolvido por processos iterativos.

O MMQ iterativo seria dado pelo seguinte modelo linearizado:

$${}_nV_1 = {}_nA_{uu} X_1 + {}_nL_1 \quad (74)$$

onde:

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0};$$

$$X = X_a - X_0;$$

$$L = L_0 - L_b;$$

n: número de equações;

u: número de incógnitas;

V: vetor dos resíduos.

X : vetor correção;

X<sub>0</sub> : vetor dos parâmetros aproximados;

L<sub>0</sub> = F(X<sub>0</sub>) Valor da função F no ponto X<sub>0</sub>;

Aplicando o MMQ a (74) tem-se:

$$X = - (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (75)$$

cujas componentes convertem os parâmetros aproximados em ajustados por:

$$X_a = X_0 + X. \quad (76)$$

O sistema é resolvido por iteração onde:

a primeira etapa é resolvida arbitrando os valores iniciais para X<sub>0</sub> e calculando L<sub>0</sub> = F(X<sub>0</sub>);

na segunda etapa (primeira iteração) X<sub>0</sub><sup>1</sup> = X<sub>a</sub>

$$A_1 X_1 + L_1 = V_1$$



$$A_1 = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0^1}; \quad L_1 = F(X_0^1) - L_b;$$

$$X_1 = - (A_1^T P A_1)^{-1} A_1^T P L_1; \quad X_a^1 = X_0^1 + X_1;$$

$$\hat{\sigma}_{0,1}^2 = \frac{V_1^T P V_1}{n - u}; \quad \sum_{X_a^1} = \hat{\sigma}_{0,1}^2 (A_1^T P A_1)^{-1}.$$

na i+1 (i-ésima iteração)  $X_0^i = X_a^{i-1}$

$$A_i X_i + L_i = V_i$$

$$A_i = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0^i}; \quad L_i = F(X_0^i) - L_b;$$

$$X_i = - (A_i^T P A_i)^{-1} A_i^T P L_i; \quad X_a^i = X_0^i + X_i;$$

$$\hat{\sigma}_{0,i}^2 = \frac{V_i^T P V_i}{n - u}; \quad \sum_{X_i^1} = \hat{\sigma}_{0,i}^2 (A_i^T P A_i)^{-1}.$$

O procedimento termina quando as correções a serem aplicadas atenderem a um critério de convergência pré-estipulado.

Para empregar o MMQ é necessário formular modelos funcionais e estocásticos adequados. Os modelos funcionais adotados neste trabalho são : equação afim no plano, equação projetiva, equação da DLT e a equação de colinearidade com parâmetros adicionais

O modelo estocástico adotado é o modelo de Gauss-Markov, que é um modelo linear, comumente empregado em fotogrametria, que relaciona as observações ( $L_b$ ) aos parâmetros ( $X$ ) da seguinte forma :

$$E(L_b) = AX \text{ ou } E(L_a - V) = AX$$

$$E(\epsilon \epsilon^T) = \sigma_0^2 Q = \sigma_0^2 P^{-1} = \Sigma$$

onde:

$\epsilon$  : vetor dos erros das observações,

$\sigma_0^2$  : variância *a priori*.

Para empregar este modelo considera-se :

1. O número de equações (n) deve exceder o número de parâmetros incógnitos (u), ou seja,  $n > u$ ;

2. Os erros das observações são aleatórios com esperança zero :

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2_L), \text{ onde } \sigma^2_L \text{ é a variância da observação};$$

3. As observações são normalmente distribuídas com esperança AX e variância  $\Sigma$  :

$$L_b \sim N(AX, \Sigma);$$

4. As observações são mutuamente independentes.

#### 2.3.5.1 Transformação afim

Analisando a equação da transformação afim nota-se que os  $a_{ij}$  e os  $b_i$  são grandezas que se vinculam às observações diretas  $x'$ ,  $y'$  e  $x$  e  $y$ . Desta forma os  $a_{ij}$  e os  $b_i$  são designados como parâmetros e o método de ajuste utilizado será o paramétrico, ou seja :

$${}_n V_1 = {}_n A_{u \ u} X_1 + {}_n L_{b \ 1} \quad (77)$$

onde:

$A = \frac{\partial F}{\partial X}$  : matriz das derivadas parciais de F em relação a X, com F sendo as

equações do modelo;

X : vetor dos parâmetros a serem calculados;

V : vetor do resíduo;

$L_b$  : vetor das observações

n: número de equações;

u: número de incógnitas;

Seja a transformação afim abaixo para um ponto genérico P:

$$F1 \rightarrow x'_p = a_{11} x_p + a_{12} y_p + b_1$$

$$F2 \rightarrow y'_p = a_{21} x_p + a_{22} y_p + b_2$$

Derivando F1 e F2 em relação aos parâmetros  $a_{ij}$  e  $b_i$  tem-se:

$$\frac{\partial F1}{\partial a_{11}} = x_p, \frac{\partial F1}{\partial a_{12}} = y_p, \frac{\partial F1}{\partial a_{21}} = 0, \frac{\partial F1}{\partial a_{22}} = 0, \frac{\partial F1}{\partial b_1} = 1, \frac{\partial F1}{\partial b_2} = 0$$

$$\frac{\partial F2}{\partial a_{11}} = 0, \frac{\partial F2}{\partial a_{12}} = 0, \frac{\partial F2}{\partial a_{21}} = x_p, \frac{\partial F2}{\partial a_{22}} = y_p, \frac{\partial F2}{\partial b_1} = 0, \frac{\partial F2}{\partial b_2} = 1$$

Para r pontos a matriz A seguinte terá a dimensão  $2*r \times 6$ :

$$2*r A_6 = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_1 & y_1 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_r & y_r & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_r & y_r & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para r pontos a matriz peso terá dimensão  $2*r \times 2*r$ :

$$2*r P_{2*r} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma^2_{x_1}} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma^2_{y_1}} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma^2_{x_r}} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{\sigma^2_{y_r}} \end{bmatrix}$$

Para  $r$  pontos a matriz  $L_b$  terá dimensão  $2 \times r$  x  $1$ :

$$L_b = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \cdots \\ x_r \\ y_r \end{bmatrix}$$

Aplicando o MMQ a (74), e lembrando que o modelo é linear, tem-se:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L_b \quad (78)$$

que corresponde aos parâmetros ajustados.

Resolvido o sistema, pode-se determinar a precisão com que foram obtidos os parâmetros ajustados ( $X_a$ ) por :

$$\sum_{X_a} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1}, \text{ com } \hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n - u}. \quad (79)$$

onde :

$$V = A X_a - L_b;$$

$$\sum_{X_a} = \text{Matriz variância-covariância (MVC) dos parâmetros ajustados}$$

Pode-se calcular também a precisão das observações pela seguinte expressão :

$$\sum_{L_a} = \hat{\sigma}_0^2 A (A^T P A)^{-1} A^T \quad (80)$$

Os parâmetros e as observações podem ser avaliadas, após o ajustamento, pela análise das suas respectivas matrizes variância-covariâncias. A análise das variâncias nestas MVCs podem apontar os parâmetros ou observações sujeitas a erros.

Segundo DALMOLIN (1995), quando se reúne numa equação parâmetros de natureza diferentes, é recomendado resolver o sistema pelo MMQ através do processo iterativo para garantir a convergência, certificando a estabilidade da solução já que cada parâmetro tem velocidade de convergência diferente. A transformação afim traz imbutida nos seus parâmetros  $a_{ij}$  os efeitos de rotação, escala e não ortogonalidade dos eixos. Assim, são envolvidos elementos de naturezas diferentes e que, por recomendação, necessitaria o MMQ iterativo.

A matriz variância-covariância das observações pode ser calculada pela expressão (80) comentada anteriormente.

### 2.3.5.2 Equação de colinearidade

Para o caso da fotogrametria a curta distância empregando câmaras não métricas pode-se utilizar apenas o coeficiente  $K_1$  para modelar as distorções de lente, como mostra claramente os estudos de SILVA (1995). Assim, desprezando os demais índices pode-se escrever a equação de colinearidade como uma função de :

$$F(X_a, L_a) = 0$$

Após a linearização do modelo tem-se :

$$AX + BV + W = 0 \quad (81)$$

A equação 81 corresponde ao modelo matemático do método combinado. Entretanto pode-se transformar o modelo acima para o modelo paramétrico fazendo as seguintes considerações :  $B = -I$  e  $L = (W - L_b)$ .

Assim temos :

$${}_n V_1 = {}_n A_{u \ u} X_1 + {}_n L_1 \quad (82)$$

onde:

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0} : \text{matriz das derivadas parciais de } F \text{ em relação a } X_a \text{ tomada no}$$

ponto  $X_0$ , com  $F$  a função definida;

$X$  = vetor das correções dos parâmetros a serem estimados;

$V$  : vetor do resíduo;

$L = L_0 - L_b$  vetor da diferença entre o valor da função  $F$  no ponto  $X_0$  e os valores observados;

$n$ : número de equações ou observações;

$u$ : número de incógnitas;

Segundo SILVA (1995) o modelo matemático funcional tradicional empregado na autocalibração de câmaras não métricas é dado por :

$$\begin{aligned} F_1 &= x_0 - \Delta x - f \cdot \frac{m_{11}(X - X^C) + m_{12}(Y - Y^C) + m_{13}(Z - Z^C)}{m_{31}(X - X^C) + m_{32}(Y - Y^C) + m_{33}(Z - Z^C)} \\ F_2 &= y_0 - \Delta y - f \cdot \frac{m_{21}(X - X^C) + m_{22}(Y - Y^C) + m_{23}(Z - Z^C)}{m_{31}(X - X^C) + m_{32}(Y - Y^C) + m_{33}(Z - Z^C)} \end{aligned} \quad (83)$$

onde :

$$\begin{aligned} \Delta x &= (x - x_0) \left[ k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right] - \left\{ P_1 \left[ r^2 + 2(x - x_0)^2 \right] + 2P_2 (x - x_0)(y - y_0) \right\} - A(y - y_0) \\ \Delta y &= (y - y_0) \left[ k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \right] - \left\{ P_2 \left[ r^2 + 2(y - y_0)^2 \right] + 2P_1 (x - x_0)(y - y_0) \right\} - B(y - y_0) \end{aligned}$$

que correspondem às correções dos erros sistemáticos em  $x$  e  $y$  respectivamente.

Considerando os parâmetros de calibração negligenciados, tem-se :

$$\begin{aligned} \Delta x &= (x - x_0) k_1 r^2 - A(y - y_0) \\ \Delta y &= (y - y_0) k_1 r^2 - B(y - y_0) \end{aligned}$$

Como as equações de observações não são lineares, é necessário linearizá-las através da expansão em série de Taylor. Na aplicação do MMQ os termos de segunda ordem em diante são desprezados, por isso, é necessário recorrer ao processo iterativo para determinar a solução do sistema de equações normais.

Seja:

$$R = m_{11}(X - X^C) + m_{12}(Y - Y^C) + m_{13}(Z - Z^C);$$

$$P = m_{21}(X - X^C) + m_{22}(Y - Y^C) + m_{23}(Z - Z^C);$$

$$T = m_{31}(X - X^C) + m_{32}(Y - Y^C) + m_{33}(Z - Z^C).$$

Obtendo os elementos da matriz A para um ponto genérico, tem-se:

$$\frac{\partial F_1}{\partial X^C} = f\left(\frac{-m_{11}T + m_{31}R}{T^2}\right) \quad [1];$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial X^C} = -f\left(\frac{-m_{21}T + m_{31}P}{T^2}\right) \quad [2];$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial Y^C} = -f\left(\frac{-m_{12}T + m_{32}R}{T^2}\right) \quad [3];$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial Y^C} = -f\left(\frac{-m_{22}T + m_{32}P}{T^2}\right) \quad [4];$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial Z^C} = -f\left(\frac{-m_{13}T + m_{33}R}{T^2}\right) \quad [5];$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial Z^C} = -f\left(\frac{-m_{23}T + m_{33}P}{T^2}\right) \quad [6];$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial \kappa} = -f\left(\frac{m_{21}(X - X^C) + m_{22}(Y - Y^C) + m_{23}(Z - Z^C)}{T}\right) = -f\left(\frac{P}{T}\right) \quad [7];$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \kappa} = f\left(\frac{m_{12}(X - X^C) + m_{12}(Y - Y^C) + m_{13}(Z - Z^C)}{T}\right) = f\left(\frac{R}{T}\right) \quad [8];$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial \phi} = -\frac{f}{T}\left(-\cos\kappa \cdot T - \frac{R}{T}(\cos\kappa \cdot R - \sin\kappa \cdot P)\right) \quad [9];$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \phi} = -\frac{f}{T} \left( \sin \kappa \cdot T - \frac{P}{T} (\cos \kappa \cdot R - \sin \kappa \cdot P) \right) \quad [10];$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial \omega} = -\frac{f}{T} (m_{12}(Z - Z^c) - m_{13}(Y - Y^c)) \quad [11];$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \omega} = -\frac{f}{T} (m_{22}(Z - Z^c) - m_{23}(Y - Y^c)) \quad [12];$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial f} = -\frac{R}{T} \quad [13];$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial f} = -\frac{P}{T} \quad [14];$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial x_0} = 1 - K_1 \left[ r^2 - 2(x - x_0)^2 \right] \quad [15];$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial x_0} = -2K_1(x - x_0)(y - y_0) \quad [16];$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial y_0} = -2K_1(x - x_0)(y - y_0) - A \quad [17];$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial y_0} = 1 - K_1 \left[ r^2 - 2(y - y_0)^2 \right] - B \quad [18];$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial K_1} = -(x - x_0) \cdot r^2 \quad [19];$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial K_1} = -(y - y_0) \cdot r^2 \quad [20];$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial A} = -(y - y_0) \quad [21];$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial A} = 0 \quad [22];$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial B} = 0 \quad [23];$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial B} = -(y - y_0) \quad [24];$$



Para r pontos a matriz A terá a dimensão  $2*r \times 12$ :

$${}_{2*r}A_{12} = \begin{array}{c} \text{Ponto 1} \\ \left[ \begin{array}{cccccccccccc} 1 & 3 & 5 & 7 & 9 & 11 & 13 & 15 & 17 & 19 & 21 & 23 \\ 2 & 4 & 6 & 8 & 10 & 12 & 14 & 16 & 18 & 20 & 22 & 24 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 3 & 5 & 7 & 9 & 11 & 13 & 15 & 17 & 19 & 21 & 23 \\ 2 & 4 & 6 & 8 & 10 & 12 & 14 & 16 & 18 & 20 & 22 & 24 \end{array} \right] \\ \text{Ponto r} \end{array}$$

Para r pontos a matriz peso terá dimensão  $2*r \times 2*r$ :

$${}_{2*r}P_{2*r} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma^2_{x_1}} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma^2_{y_1}} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma^2_{x_r}} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{1}{\sigma^2_{y_r}} \end{bmatrix}$$

Para r pontos a matriz  $L_b$  terá dimensão  $2*r \times 1$ :

$$L_b = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \dots \\ x_r \\ y_r \end{bmatrix}$$

Aplicando o MMQ tem-se:

$$X = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (85)$$

cujas componentes convertem os parâmetros aproximados em ajustados por:

$$X_a = X_0 + X. \quad (86)$$

O sistema é resolvido por iteração.

### 2.3.5.3 Equação da DLT

Observando a equação da DLT, expressa anteriormente, pode-se representá-la pela seguinte função :

$$F(X, L_b) = 0 \quad (87)$$

que corresponde ao modelo matemático do método combinado.

Considerando as mesmas observações do item anterior, temos :

$${}_n V_1 = {}_n A_{uu} X_1 + {}_n L_{b1} \quad (88)$$

onde:

$A = \frac{\partial F}{\partial X}$  : matriz das derivadas parciais de F em relação a X;

X = vetor dos parâmetros a serem calculados;

V : vetor do resíduo;

$L_b$  = vetor das observações;

n: número de equações;

u: número de incógnitas;

Para  $r$  pontos a matriz  $A$  terá a dimensão  $2*r \times 12$ :

$${}_{2*r}A_{12} = \begin{array}{c} \text{Ponto 1} \\ \left[ \begin{array}{cccccccccccc} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1 X_1 & -x_1 Y_1 & -x_1 Z_1 & -x_1' r^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -y_1 X_1 & -y_1 Y_1 & -y_1 Z_1 & -y_1' r^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_r & X_r & X_r & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_r X_r & -x_r Y_r & -x_r Z_r & -x_r' r^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_r & X_r & X_r & 1 & -y_r X_r & -y_r Y_r & -y_r Z_r & -y_r' r^2 \end{array} \right] \\ \text{Ponto r} \end{array}$$

Para  $r$  pontos a matriz peso terá dimensão  $2*r \times 2*r$ , já mostrada anteriormente. Para  $r$  pontos a matriz  $L_b$  terá dimensão  $2*r \times 1$ , também já mostrada.

Aplicando o MMQ tem-se:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L_b \quad (89)$$

A matriz variância-covariância das observações pode ser calculada pela expressão (80) comentada anteriormente.

#### 2.3.5.4 Equação projetiva

A equação projetiva na notação matemática colocada anteriormente se apresenta de forma não linear. Segundo AMORIN e TOMMASSELLI (1989), pode-se, então, reescrevê-la da seguinte forma:

$$\begin{aligned} F_x = x &= a_1 X + a_2 Y + a_3 - a_4 x X - a_5 x Y \\ F_y = y &= a_6 X + a_7 Y + a_8 - a_4 y X - a_5 y Y \end{aligned} \quad (90)$$

ou

$$L_0 = F(X_0) \text{ ou } L_0 = F(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8) \quad (91)$$

Segundo o mesmos autores, considerando que o modelo é linear e que os termos x e y possam ser considerados fixos, a solução pelo MMQ é dada pelo método paramétrico sem iteração. Entretanto, para garantir a convergência do modelo, o MMQ foi resolvido com iteração.

Assim temos :

$${}_n V_1 = {}_n A_{uu} X_1 + {}_n L_1 \quad (92)$$

onde:

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0} : \text{matriz das derivadas parciais de F em relação a } X_a \text{ tomada no}$$

ponto  $X_0$ , com F a função definida;

X = vetor das correções dos parâmetros a serem calculados;

V : vetor do resíduo;

L =  $L_0 - L_b$  vetor da diferença entre o valor da função F no ponto  $X_0$  e os valores observados;

n: número de equações;

u: número de incógnitas;

Para r pontos a matriz A terá a dimensão  $2*r \times 8$ :

$${}_{2*r} A_8 = \begin{array}{c} \text{Ponto 1} \\ \left[ \begin{array}{ccccccccc} X_1 & Y_1 & 1 & -x_1 X_1 & -x_1 Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -y_1 X_1 & -y_1 Y_1 & X_1 & Y_1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_r & Y_r & 1 & -x_r X_r & -x_r Y_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -y_r X_r & -y_r Y_r & X_r & Y_r & 1 \end{array} \right] \\ \text{Ponto r} \end{array}$$

P e L já foram vistas

Aplicando o MMQ tem-se:

$$X = - (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (93)$$

cujas componentes convertem os parâmetros aproximados em ajustados por:

$$X_a = X_0 + X. \quad (94)$$

O sistema é resolvido por iteração como explanado anteriormente..

### 2.3.6 Análise da precisão

É de interesse conhecer a precisão com que os dados e as feições arquitetônicas, serão retiradas numa imagem. Assim, deve-se ter parâmetros para julgar tal precisão. Segundo SILVA (1995), os indicadores de precisão do ajustamento em fotogrametria podem ser classificados como medidas de precisão locais, quando resultam em informações sobre os pontos isoladamente, ou medidas de precisão globais, quando informam sobre o conjunto do levantamento. Para os objetivos deste trabalho é mais conveniente adotar uma medida de precisão global.

O erro médio quadrático (EMQ), a partir de pontos de checagem, é um parâmetro ideal para estimar a precisão. Se  $(X_{iv}; Y_{iv}; Z_{iv})$  são coordenadas observadas dos  $n$  pontos de checagem e  $(X_{it}; Y_{it}; Z_{it})$  são as coordenadas destes mesmos pontos calculadas pela aplicação de uma relação sobre os pontos imagens correspondentes, então o erro médio quadrático pode ser dado por :

$$R_{XYZ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(X_{it} - X_{iv})^2 + (Y_{it} - Y_{iv})^2 + (Z_{it} - Z_{iv})^2]}{n}} \quad \text{com } i = 1, \dots, n \quad (95)$$

Também é interessante determinar a diferença máxima encontrada entre os  $n$  pontos de checagem pela seguinte expressão:

$$R_{MAX_{XYZ}} = MAX \left( \sqrt{[(X_{it} - X_{iv})^2 + (Y_{it} - Y_{iv})^2 + (Z_{it} - Z_{iv})^2]} \right) \quad (96)$$

Segundo Hottier apud SILVA (1995), na falta de pontos de checagem é possível usar os resíduos dos pontos de apoio, cujo EMQ é dado pela equação 95. Entretanto, se o número de pontos de apoio for inferior a 30 ocorre uma superestimativa de exatidão a qual deverá ser contornada multiplicando EMQ por um fator K dado pela seguinte equação :

$$K = \sqrt{\frac{pn}{pn - r}} \quad (97)$$

onde :

- r : número de parâmetros;
- n : número de pontos de checagem;
- p : número de equações de observações de cada ponto.

Quando a análise for feita pela comparação entre distâncias levantadas e distâncias calculadas, será levado em consideração o erro relativo percentual médio. Nesta etapa utilizou-se a metodologia proposta por VILLELA e AGUIRRE (1996).

Para o cálculo dos erros, serão aplicadas as seguintes fórmulas :

$$EV = |D_{CALC} - D_{OBS}| \quad (98)$$

$$ER = \frac{EV}{D_{REAL}} \quad (99)$$

$$ERP = ER \times 100 \quad (100)$$

onde :

$D_{CALC}$  : Distância calculada com coordenadas transformadas;

$D_{OBS}$  : Distâncias observada.

As equações anteriores correspondem ao erro verdadeiro, erro relativo e erro relativo percentual.

### 2.3.7 Determinação da grade regular da ortoimagem

Para gerar a ortoimagem, utilizando o mapeamento inverso, deve-se partir de uma grade regular, onde as posições dos *pixels* são dadas em números inteiros. Entretanto, quando se relaciona o espaço imagem com o espaço objeto, é necessário discretizar este último, ou seja, é necessário criar uma grade regular onde as coordenadas dos pontos sejam números inteiros.

Segundo ALMEIDA (1989) na produção de ortofotos convencionais o tamanho do pixel para rasterização da foto depende da relação entre escala da ortofoto e a escala da foto original. Essa relação deve ser cerca de 2,5, ou seja, uma foto digitalizada com tamanho do pixel igual a 50  $\mu\text{m}$  (508 dpi), geraria uma ortofoto com resolução de 125  $\mu\text{m}$  (203 dpi). Essa ampliação do tamanho do pixel se deve ao tamanho da ortofoto que é cerca de 2,17 vezes maior do que a foto que o origina. Para Wiesel apud ALMEIDA(1989), não se perde informação quando se digitaliza uma foto aérea com uma resolução de 50  $\mu\text{m}$ , e que uma ortofoto com resolução de 167  $\mu\text{m}$  ainda apresenta qualidade visual aceitável. Pode-se estender a afirmação de Wiesel para uma fotografia terrestre, uma vez que as câmaras utilizadas na obtenção destas fotografias se assemelham a aquelas utilizadas na fotografia aérea.

Em seu estudo de ortofoto digital, ALMEIDA (1989) considerou uma grade fina de 2,5m por 2,5m para gerar uma ortofoto a partir de uma foto aérea na escala aproximada de 1:18400. Analisando a relação entre a dimensão da grade e a escala da foto pode-se notar que a dimensão da grade corresponde a 136  $\mu\text{m}$  na respectiva escala. Segundo MENDONÇA (1995) os levantamentos empregados na documentação sistemática da arquitetura são efetuados, geralmente, na escala de 1/100, os quais geram trabalhos finais na escala de 1/50 e os detalhes na escala de 1/20 ou 1/10.

Adotando a relação usada por ALMEIDA (1989) de 136 $\mu\text{m}$  na escala dos levantamentos citada por MENDONÇA (1995), tem-se uma grade regular de 1,36 cm. Tal relação corresponderia a digitalizar a fotografia a uma resolução de 186 dpi.

Segundo SALLEM FILHO (1995) é recomendado o uso de pixels com o tamanho entre 20  $\mu\text{m}$  (1270 dpi) e 30  $\mu\text{m}$  (846 dpi) para a produção de ortofotos convencionais atualmente. Para as fotografias utilizadas neste trabalho (15 cm x 10 cm) o tamanho dos

arquivos, segundo as especificações do autor, corresponderia a 36,6 Mb e 16,2 Mb respectivamente.

Adotando a recomendação de Wiesel, tamanho do pixel de 50  $\mu\text{m}$  ou 508 dpi, o tamanho do arquivo corresponderia a 5,8 Mb. Se for escolhida a resolução de ALMEIDA (1989) o tamanho do arquivo corresponderia a 786 K.

A escolha de uma resolução afeta diretamente o tempo de processamento e a capacidade do sistema de gerenciar os arquivos digitais. No sistema proposto neste trabalho verificou-se que o mesmo não suportava arquivos superiores a 8 Mb com a configuração da máquina em uso. Entretanto, para as dimensões das fotos em estudo, 15 cm x 10 cm, o tamanho do arquivo digital máximo permitido, ou seja 8 Mb, corresponde a uma resolução superior a recomendada por Wiesel.

Optou-se por manter próximo a relação entre as dimensões do *pixels* e sua projeção no espaço objeto.

Por exemplo, seja a figura 21.a o quadrilátero (ABCD) no espaço objeto, a figura 21.b o mesmo quadrilátero no espaço imagem e N um modelo matemático que os relacionam.

Sejam  $D^x_{\overline{P_1P_2}} = \text{abs}(X_{P_1} - X_{P_2})$  e  $D^y_{\overline{P_1P_4}} = \text{abs}(Y_{P_1} - Y_{P_4})$  as distâncias em módulo, nos eixos x e y respectivamente, entre o ponto ( $P_1$ ) e os ponto ( $P_2$ ) e ( $P_4$ ) no espaço objeto, cujas coordenadas foram obtidas aplicando N aos pontos extremos da imagem da figura 20.b, ou seja :

$$\begin{aligned}(X_{P_1}, Y_{P_1}) &= N(0,0) \\ (X_{P_2}, Y_{P_2}) &= N(0, j_{\text{máx}}) \\ (X_{P_3}, Y_{P_3}) &= N(i_{\text{máx}}, j_{\text{máx}}) \\ (X_{P_4}, Y_{P_4}) &= N(i_{\text{máx}}, 0)\end{aligned}$$

onde  $i_{\text{máx}}$  e  $j_{\text{máx}}$  correspondem, respectivamente, ao número máximo de linhas e colunas da imagem.

Então, a relação *pixel* por unidade de medida linear, nos dois eixos, será:

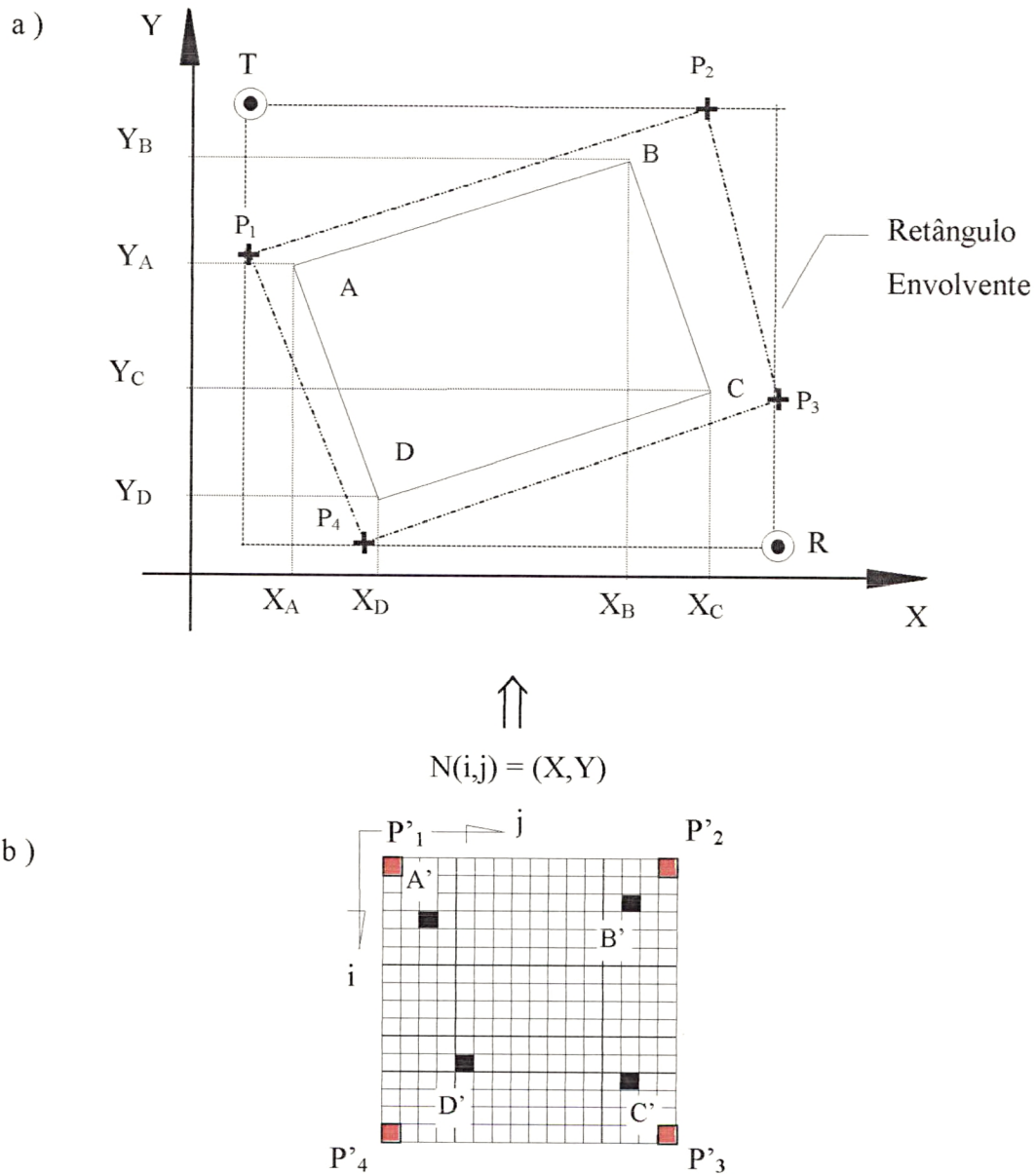
$$\Delta x = \frac{j_{\text{máx}} + 1}{D^x} \quad \text{e} \quad \Delta y = \frac{i_{\text{máx}} + 1}{D^y} \quad (101)$$



Os valores obtidos acima são diferentes, assim, adotou-se um valor médio.

$$\Delta xy = \frac{\Delta x + \Delta y}{2} \quad (102)$$

FIGURA 21 : (a) quadrilátero (ABCD) no espaço objeto e (b) quadrilátero (A'B'C'D') no espaço imagem



Determina-se o retângulo envolvente do quadrilátero ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ ) encontrando os valores mínimos e máximos assumidos pelas coordenadas dos pontos  $P_i$ , ou seja:

$$X_R = \max \{X_{P_1}, X_{P_2}, X_{P_3}, X_{P_4}\}$$

$$Y_R = \min \{Y_{P_1}, Y_{P_2}, Y_{P_3}, Y_{P_4}\}$$

$$X_T = \min \{X_{P_1}, X_{P_2}, X_{P_3}, X_{P_4}\}$$

$$Y_T = \max \{Y_{P_1}, Y_{P_2}, Y_{P_3}, Y_{P_4}\}$$

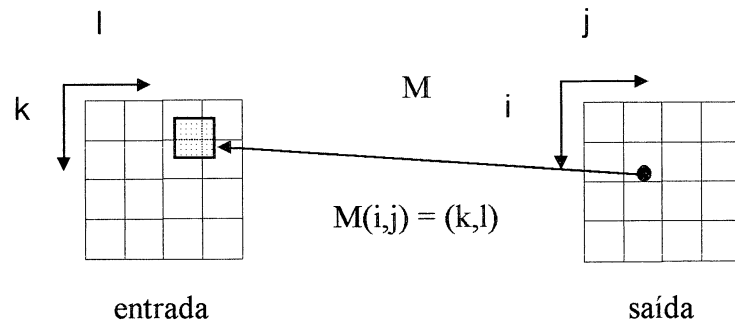
Encontrado o retângulo envolvente, determina-se o tamanho da grade regular da ortoimagem, pela seguinte equação :

$$\begin{aligned} N_L &= (Y_R - Y_T) \cdot \Delta xy \div [m] \cdot [pixels / m] \\ N_C &= (X_R - X_T) \cdot \Delta xy \div [m] \cdot [pixels / m] \end{aligned} \quad (103)$$

onde :  $N_L$  e  $N_C$  são os números de linhas e colunas respectivamente.

Encontrada a grade da ortoimagem, efetua-se o mapeamento inverso, como mostra a figura abaixo.

FIGURA 22 : Mapeamento inverso



### 2.3.8 Mapeamento inverso para as equações implementadas

#### a) Transformação afim

A expressão que possibilita o mapeamento inverso é a seguinte:

$$\begin{bmatrix} k \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X - b_1 \\ Y - b_2 \end{bmatrix} \quad (104)$$

onde :

$k$  e  $l$  : coordenadas no sistema digital;

$X$  e  $Y$  : coordenadas do espaço objeto;

Entretanto, deve-se partir da grade regular e buscar o tom de cinza no espaço imagem, que corresponderia a :

$$\begin{bmatrix} k \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \left( \frac{j}{\Delta xy} \right) - b_1 \\ \left( \frac{i}{\Delta xy} \right) - b_2 \end{bmatrix} \quad (105)$$

com  $i = 0, 1, \dots, N_L$  e  $j = 0, 1, \dots, N_C$

#### b) Equação de colinearidade

No caso de ser efetuada a retificação diferencial deve-se seguir os seguintes passos para gerar a ortoimagem :

1 - determina-se  $X$  e  $Y$  da malha da grade regular a partir das coordenadas  $i, j$  da imagem de saída via transformação isogonal. A equação então é dada por :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\Delta xy & 0 \\ 0 & 1/\Delta xy \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} j \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix} \quad (106)$$

onde :

$c$  e  $d$  são parâmetros de translação;

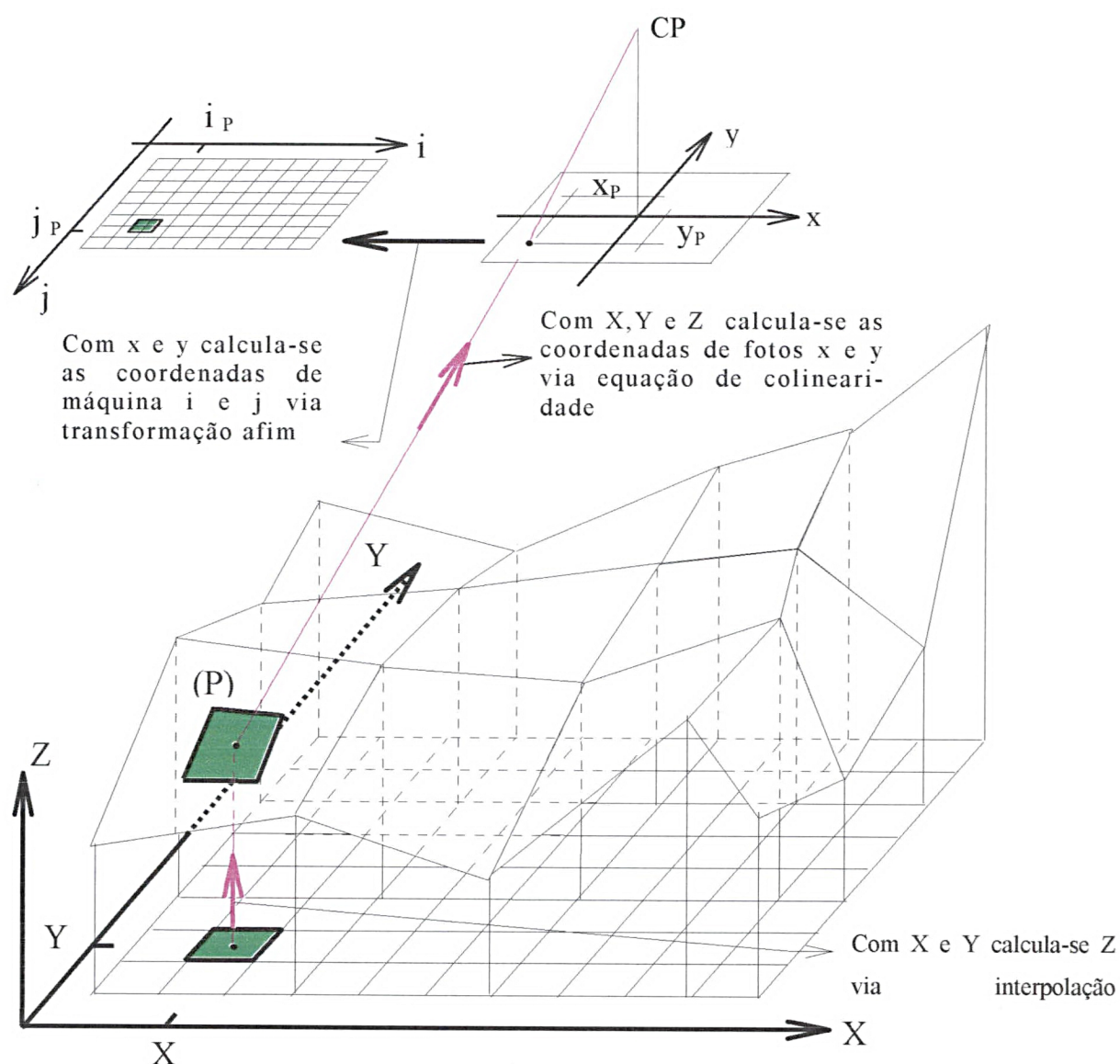
$i, j$  : linha e coluna do pixel na imagem de saída;

$\Delta xy$  : relação média de pixels/m;

$X$  e  $Y$  : coordenada do espaço objeto correspondente à posição  $i, j$  no espaço imagem.

- 2 - Com as coordenadas  $X$  e  $Y$  no espaço objeto interpola-se a coordenada  $Z$  via interpolador bilinear já comentado anteriormente;
- 3 - Com o terno  $(X, Y, Z)$  de um ponto genérico determina-se a sua respectiva fotocoordenada utilizando a equação de colinearidade parametrizada já exposta;
- 4 - com as fotocoordenadas via transformação afim determina-se as coordenadas  $i, j$  na imagem de entrada;
- 5 - interpola-se o tom de cinza utilizando um dos três interpoladores disponíveis;
- 6 - repete-se o processo até completar a imagem de saída.

FIGURA 23 : Princípio da produção de ortofoto digital usando o método indireto.



Fonte : Adaptado de ALMEIDA (1989).

A figura 23 mostra os principais passos relatados anteriormente.

#### d) Equação da DLT

Para o caso da DLT tem-se um sistema de duas equações a três incógnitas. Se a coordenada Z do ponto for conhecida pode-se resolver o sistema.

1 - determina-se X e Y da malha da grade regular a partir das coordenadas i, j da imagem de saída via transformação isogonal. Comentada anteriormente;

2 - Com as coordenadas X e Y no espaço objeto interpola-se a coordenada Z via interpolador bilinear;

3 - Com o terno (X, Y, Z) de um ponto genérico determina-se a sua respectiva coordenada em pixel na imagem;

4 - interpola-se o tom de cinza utilizando um dos três interpoladores disponíveis;

5 - repete-se o processo até completar a imagem de saída.

#### e) Equação projetiva

1 - determina-se X e Y da malha da grade regular a partir das coordenadas i, j da imagem de saída via transformação isogonal;

2 - Com (X, Y) de um ponto genérico determina-se a sua respectiva coordenada em pixel na imagem;

3 - interpola-se o tom de cinza utilizando um dos três interpoladores disponíveis;

4 - repete-se o processo até completar a imagem de saída.

A utilização desta equação não leva em consideração os deslocamentos das entidades em relação ao relevo. A modelagem considera que o objeto fotografado ou imageado é uma superfície plana.

### 3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

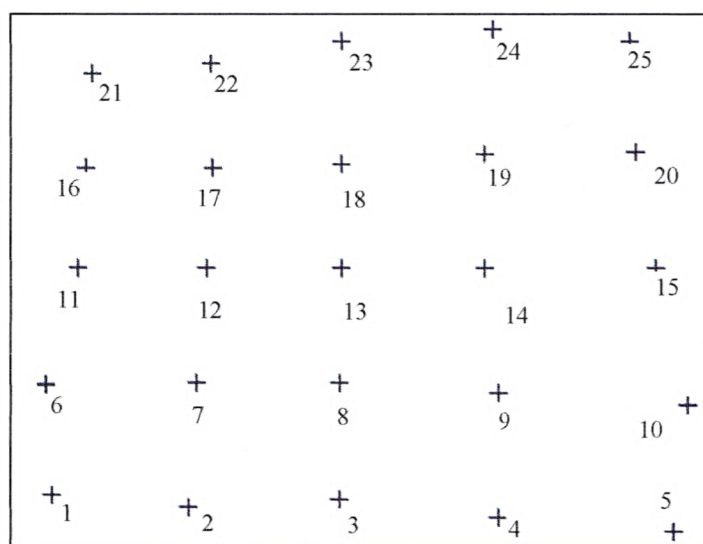
#### 3.1 MATERIAIS EMPREGADOS

Para testar a aplicabilidade do SIFAR1.0, apresentado neste trabalho, utilizou-se de seis imagens digitais, uma hipotética e cinco provenientes da digitalização de fotos. As fotografias foram obtidas por uma câmara não métrica de 35 mm.

A digitalização das fotografias foram feitas utilizando um scanner de mesa da HP não métrico, formato A4. Não houve nenhum tratamento de erros sobre as imagens geradas após a digitalização.

##### 3.1.1 Imagem hipotética

FIGURA 24 :Imagem gerada para teste.



A imagem hipotética foi gerada a partir da aplicação da equação de colinearidade sobre 25 pontos de controles previamente conhecidos ( ver anexo 12 ) e com os parâmetros de orientação exteriores e interiores fixos. A imagem hipotética foi gerada utilizando o

MATLAB. No sistema MATLAB gerou-se as fotocoordenadas dos pontos e as mesmas foram plotadas em tela via funções específicas do sistema.

Uma vez tendo a imagem em tela capturou-se e armazenou-se a mesma em arquivo tipo BMP. Assim, trabalhou-se com a resolução de vídeo, ou seja, 0.28 mm ou 280  $\mu\text{m}$ . A imagem produzida pode ser vista na figura 24.

### 3.1.2 Fotografias

As fotografias utilizadas correspondem a um levantamento fotográfico duma porção da fachada principal do Ed. Prof. Fábio Ribeiro, no campus da Universidade Federal de Viçosa-MG, onde alvos foram previamente afixados e levantados por processos topográficos.

A escolha deste prédio, entre tantos que existem no campus, efetuou-se levando em consideração os seguintes pontos :

- inexistência de obstáculos na porção fotografada, o que permitia colocar a câmara em qualquer posição desejada;
- amplo espaço na frente do prédio, o qual permitia implantar a base na posição mais adequada;
- feições simples a serem retiradas;
- iluminação adequada, sendo que o melhor horário para as tomadas das fotografias situara-se em torno das 16 horas;
- apresentava duas fachadas com diferença de profundidade superior a 20 % da distância câmara objeto.

Estabelecido o objeto a ser levantado, iniciou-se as fases de preparo do controle e cobertura fotográfica.

#### 3.1.2.1 *Preparo do controle*

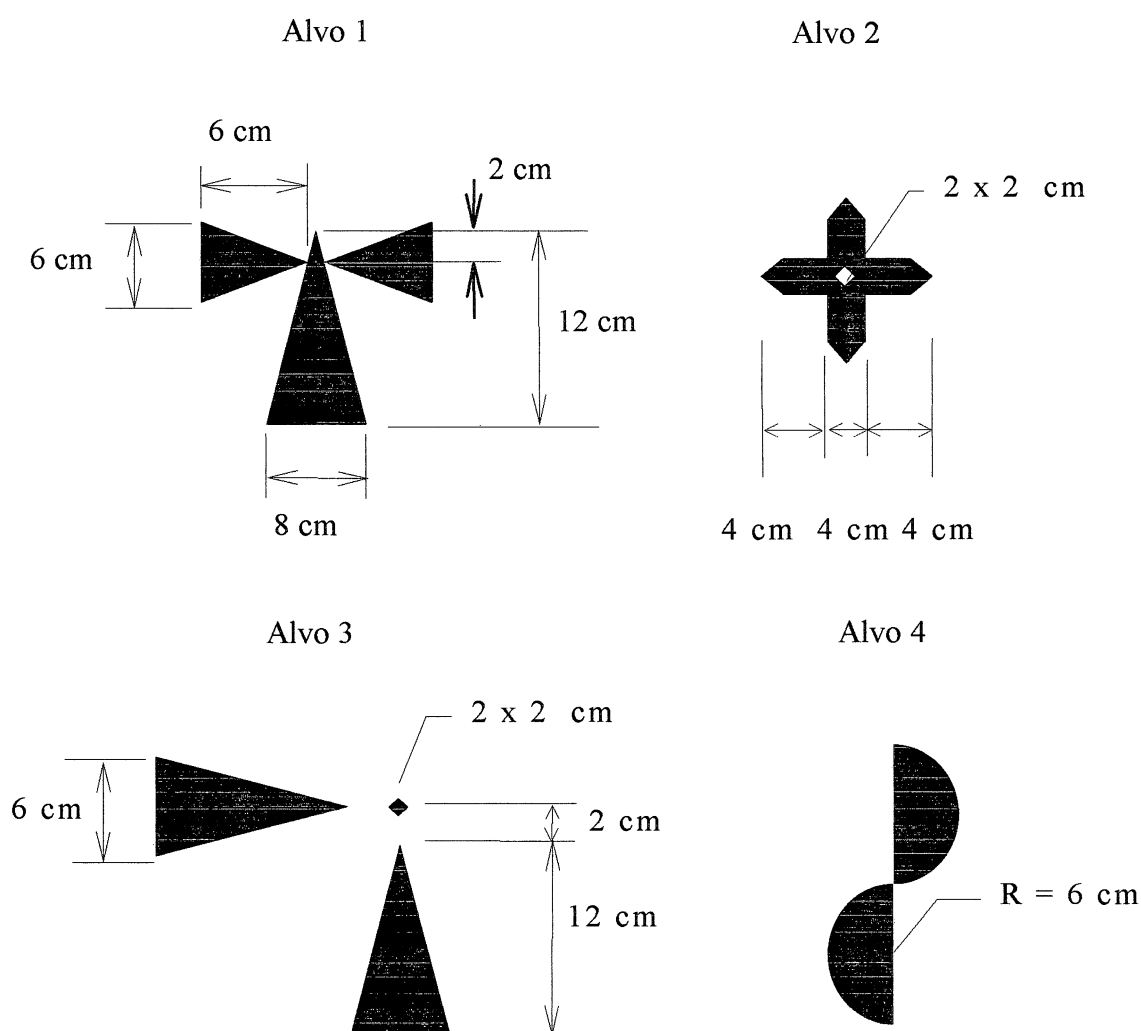
O preparo do controle foi subdividido em duas partes : confecção e fixação dos alvos sobre o objeto e o levantamento destes.

### 3.1.2.1.1 Confeção dos Alvos

Para a confecção dos alvos tomou-se por base o trabalho de MIGUEZ e TOURINHO (1991), no que diz respeito ao tipo e tamanho dos alvos.

Foram confeccionados quatro tipos de alvos, dos quais o alvo 2 é de nossa autoria. Estes foram afixados nas fachadas da edificação para que se pudesse realizar o apoio topográfico e posteriormente, com os dados levantados se obter as coordenadas tridimensionais dos pontos de controle. Cada alvo recebeu um número para que fosse analisado o seu comportamento no tocante à visada e as leituras das suas coordenadas na tela do computador. As figuras abaixo mostram, de forma esquemática, a geometria e tamanho dos alvos utilizados.

FIGURA 25 :Representação esquemática dos alvos utilizados.

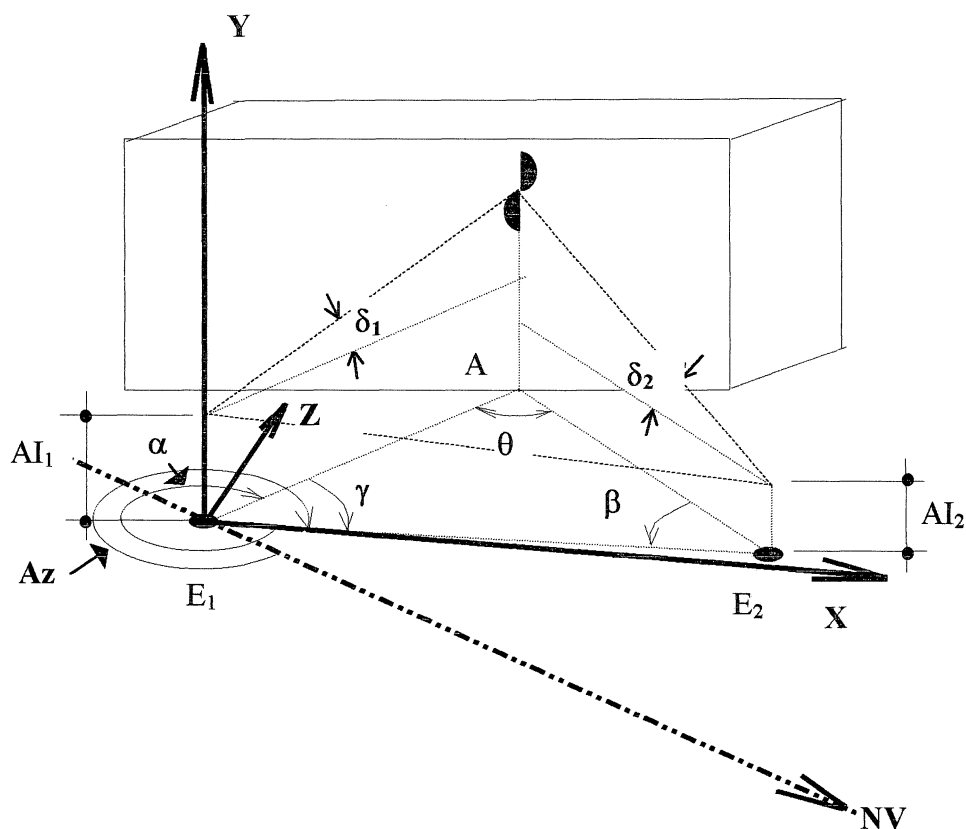




### 3.1.2.1.2 Levantamentos dos Pontos

Os pontos de controle e de checagem foram levantados pelo processo de interseção à vante, como mostra a figura abaixo. Uma representação esquemática dos pontos levantados pode ser vista na figura 27. A orientação dos eixos foram alteradas para ficar em consonância com o sistema fotogramétrico.

FIGURA 26 :Obtenção das coordenadas de um ponto por interseção a vante.



Onde :

$\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$  e  $\theta$  : são ângulos horizontais;

$\delta_1$  e  $\delta_2$ : são ângulos verticais;

AI<sub>1</sub> e AI<sub>2</sub> : alturas dos instrumentos;

Az : azimuth da base;

E<sub>1</sub> e E<sub>2</sub> : Estações.

O procedimento para obtenção das coordenadas podem ser divididos nas seguintes etapas :

a) Cálculo das distâncias Estação-Alvo

$$\overline{E_1 A} = \frac{\overline{E_1 E_2} \cdot \sin(\gamma)}{\sin(\theta)} \quad (107)$$

$$\overline{E_2 A} = \frac{\overline{E_1 E_2} \cdot \sin(\beta)}{\sin(\theta)}$$

b) Cálculo dos Azimutes das direções

$$Az_{E_1-Alvo} = Az_{E_1-E_2} - \gamma$$

$$Az_{E_2-Alvo} = Az_{E_1-E_2} + \beta$$

c) Cálculo das Coordenadas (X, Y, Z) dos Alvos

$$Z_{Alvo} = \overline{E_1 A} \cdot \sin(Az_{E_1-Alvo}) + Z_{E_1}$$

$$X_{Alvo} = \overline{E_1 A} \cdot \cos(Az_{E_1-Alvo}) + X_{E_1}$$

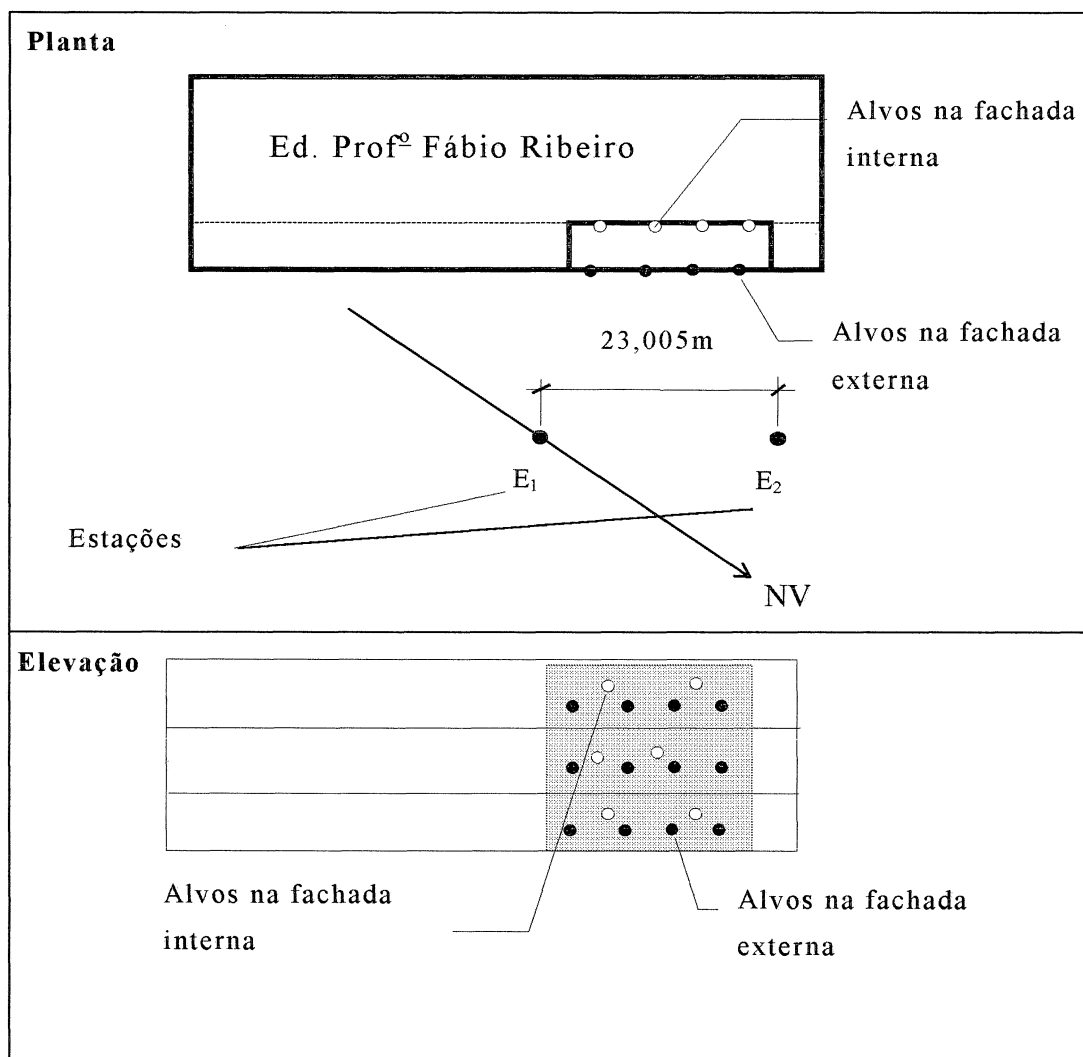
ou

$$Z_{Alvo} = \overline{E_2 A} \cdot \sin(Az_{E_2-Alvo}) + Z_{E_2}$$

$$X_{Alvo} = \overline{E_2 A} \cdot \cos(Az_{E_2-Alvo}) + X_{E_2}$$

$$Y_{Alvo} = Y_{E_i} + AI + \overline{E_i A} \cdot \tan(\delta_i) \quad (111)$$

FIGURA 27 :Representação esquemática em planta e elevação dos alvos sobre o prédio levantado.



Os ângulos horizontais e verticais foram obtidos pelo método das direções com três séries de leituras, sendo que o valor médio foi tomado pelo ângulo. Para determiná-los implantou-se uma base de 23,00 m de comprimento e distante da fachada principal de 20 m aproximadamente, a partir da qual foram feitas as leituras dos ângulos para os respectivos pontos.

A base foi medida usando um distanciômetro eletrônico (Zeiss - Th 02) numa série de 5 medidas. Escolheu-se a média das distâncias que se enquadraram dentro do intervalo de três desvios padrão. Encontrou-se uma distância corresponde a 23,005 m.

A diferença de nível entre as estações  $E_1$  e  $E_2$  que formam a base foi obtida via nivelamento geométrico de precisão, utilizando o nível de placas plano-paralelos Ni002 (5,0 mm). Foram executados um nivelamento e um contra nivelamento, resultando na seguinte diferença de nível :

$$dn_{E_1 \text{ e } E_2} = -0,1945 \text{ m.}$$

O azimute, da direção  $E_1$  e  $E_2$  foi obtido por astronomia de campo e corresponde a  $Az_{E_1 E_2} = 344^\circ 07' 53'', 24$ .

Assim , foram levantados 18 pontos. Desses pontos, 12 se encontram na fachada externa do prédio e 6 na fachada interna. Os pontos da fachada interna correspondem a feições previamente escolhidas, tais como : quinas de portas ou quinas de janelas. As coordenadas dos pontos se encontram em anexo.

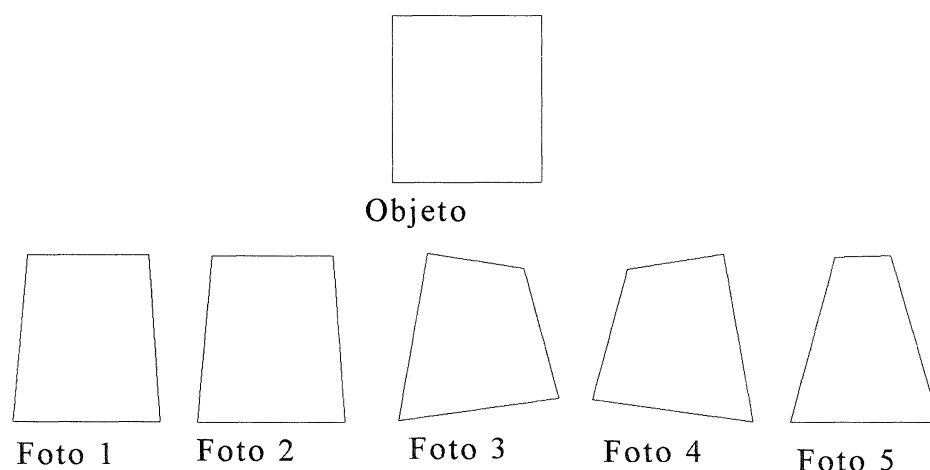
Altura do prédio é de aproximadamente 12,0 m.

### 3.1.2.1.3 Tomada das Fotografias

Como o objetivo principal do sistema implementado é retirar feições arquitetônicas, não se estabeleceu regras durante a tomada de fotos. Os parâmetros exteriores da câmara não foram fixados exatamente para dar flexibilidade na tomada das fotografias. As literaturas pesquisadas citam que o processo de retificação simples é aconselhável para fotografias de superfícies relativamente planas, cuja tomada de fotos sejam o máximo possível paralela e o eixo ótico deva ser perpendicular à face do objeto fotografado. Ainda que exista a consciência deste fato, tomou-se fotos mais variadas possíveis, onde os parâmetros externos variaram de forma aleatória, para que a sua influência possa ser notada durante a fase de teste.

Após as tomadas das fotografias foram selecionadas cinco fotos, as quais pudessem representar as posições mais comuns de se fotografar o objeto. Para tal, tomou-se duas tomadas de frente do objeto, uma à esquerda, outra à direita e uma tomada de baixo para cima; de tal sorte que a perspectiva nas tomadas das fotos produzissem os efeitos, mostrados na figura 28 .

FIGURA 28 : Representação esquemática do efeito de perspectiva sobre as fotografias utilizadas



O objetivo desta variação de posição é notar a influência da mesma sobre a precisão dos pontos e consequentemente sobre as feições retiradas.

Cada fotografia foi digitalizada a 600 dpi, cuja resolução é superior à recomendada por Wiesel apud ALMEIDA (1989). As cinco imagens utilizadas se encontram no anexo 3.

### 3.2 METODOLOGIA

Para avaliar a performance do aplicativo desenvolvido, determinou-se que o mesmo fosse capaz de efetuar as seguintes tarefas :

- a) receber dados (imagens digitais);
- b) coletar pontos de controle e de checagem, diferenciando um do outro;
- c) efetuar os cálculos de uma das quatro equações implementadas;
- d) emitir informações sobre o ajustamento executado para o vídeo, impressora ou arquivo;
- e) gerar a retificação;
- f) extrair feições ;
- g) exportar feições para arquivo DXF.

Após a retificação e extração de feições serão analisados os resultados para a verificação da aplicabilidade do SIFAR1.0. Para tal, testes estatísticos serão feitos bem como avaliações do EMQ(Geral), EMQ(PC), EMQ(PT), EV médio e ERP.

### 3.2.1 Entrada de dados

A entrada de dados para o aplicativo se faz pela criação de um projeto e consequentemente pela abertura de uma imagem tipo BMP. A entrada de dados se encontra detalhada no tópico 3.3.1.

### 3.2.2 Coleta de pontos

A coleta dos pontos é feita sobre a imagem aberta no aplicativo com ferramenta de *zoom*. A precisão dos pontos é de um *pixels*. A identificação dos mesmos, controle ou checagem, pode ser feita na abertura de um arquivo tipo AUX ou em tempo de processamento. Para maiores esclarecimentos sobre esses itens ver o tópico 3.3.2.2.1.

### 3.2.3 Cálculo dos parâmetros das equações implementadas

Foram estudados e implementados os seguintes modelos matemáticos : transformação afim no plano, transformação projetiva no plano, equação da DLT e equação de colinearidade com parâmetros adicionais. As respectivas equações e observações se encontram no tópico 2.3.4. A obtenção dos parâmetros de cada equação se faz pelo método dos mínimos quadrados (MMQ) utilizando o método paramétrico. Para maiores esclarecimentos sobre esse item, retornar ao tópico 2.3.5.

### 3.2.4 Informações sobre o ajustamento

O aplicativo desenvolvido permiti gerar relatórios contendo diversas informações úteis para avaliação do ajustamento. As seguintes informações podem ser encontradas :

- a) Informações sobre nome do projeto, nome da imagem ou projeto em análise, data, responsável, resolução da imagem e número total de pontos levantados;
- b) Valores dos parâmetros da(s) equação(ões) utilizada(s);
- c) Número de pontos utilizados no cálculo dos parâmetros;
- d) EMQ(PC), EMQ(PT), EMQ(Geral),  $S^2(PC)$ ,  $S^2(PT)$ ,  $S^2(Geral)$ , maior erro, menor erro, Estação do maior erro, estação do menor erro e valor do  $\hat{\sigma}_0^2$ ;
- e) Quadro com as coordenadas dos pontos levantados e transformados, bem como os desvios entre eles;
- f) Quadro com as distâncias observadas e calculadas, bem como os desvios entre elas. Neste quadro tem-se também o EV médio, Desvio médio de EV e o desvio padrão de EV, bem como o ERP, desvio médio de ER e desvio padrão de ER.
- g) Para o caso da equação de colinearidade os parâmetros da transformação afim que liga o sistema de máquina ( pixels ) com o sistema de foto ( fotocoordenadas ) está presente. Para esta equação, também são acrescentados os seguintes quadros : quadro das fotocoordenadas observadas e transformadas com os seus respectivos desvios e quadro das correções dos erros sistemáticos efetuados sobre as fotocoordenadas.

Um relatório típico do SIFAR1.0 se encontra no anexo 13.

### 3.2.5 Retificação

A retificação digital consiste em corrigir as distorções devido ao relevo e a inclinação da imagem. O tópico 2.3 faz uma abordagem dos métodos empregados para a retificação digital enquanto que no tópico 3.3.2.2.1 tem-se o procedimento para efetuar uma retificação no SIFAR1.0.

De um modo geral deve-se executar os seguintes passos para efetuar uma retificação digital :

- selecionar os pontos de controle;
- escolher uma equação e determinar os seus parâmetros;
- escolher um interpolador.

Para cada equação tem-se particularidades na geração da retificação. Dos modelos matemático implementados dois efetuam uma transformação 3D-2D (colinearidade e DLT) e os demais 2D-2D (afim e projetiva). As distorções devido ao relevo, inclinação da imagem e erros sistemáticos ( ver tópico 2.2.2), são corrigidas com as duas primeiras equações. O uso da transformação afim e projetiva são formas aproximadas para efetuar a retificação de imagens digitais. Neste caso, as distorções ainda permanecem presentes, porém, os seus efeitos foram apenas minimizados.

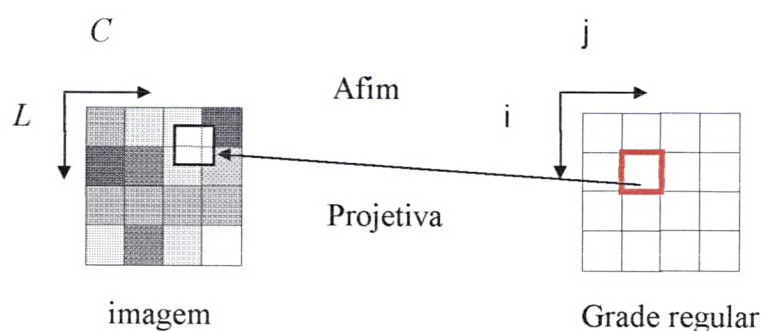
A retificação digital com a equação de colinearidade e DLT requer conhecimento do relevo da região e ser retificada. Essa informação pode ser ignorada quando se trabalha com a afim e projetiva.

Uma vez determinada a grade regular da imagem de saída ( ver tópico 2.3.7) a geração da retificação para cada equação pode ser efetuada seguindo os seguinte passos :

a) transformação afim e projetiva

- Seleciona-se um pixel  $(i,j)$  na grade regular e aplica-se a transformação afim ou projetiva sobre este levando-o para a imagem;

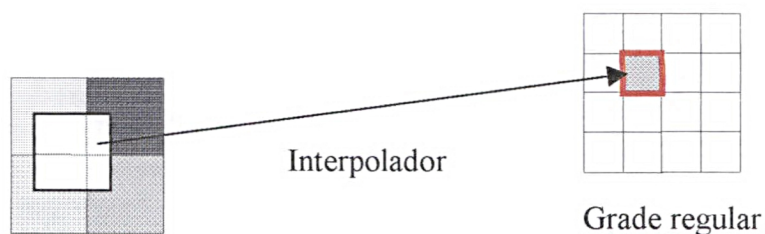
FIGURA 29 : Passo 1 da retificação digital usando a transformação afim ou projetiva





- 2 – Utiliza-se um interpolador e determina-se o tom de cinza a ser colocado na posição  $(i,j)$  da grade;

FIGURA 30 : Passo 2 da retificação digital usando a transformação afim ou projetiva

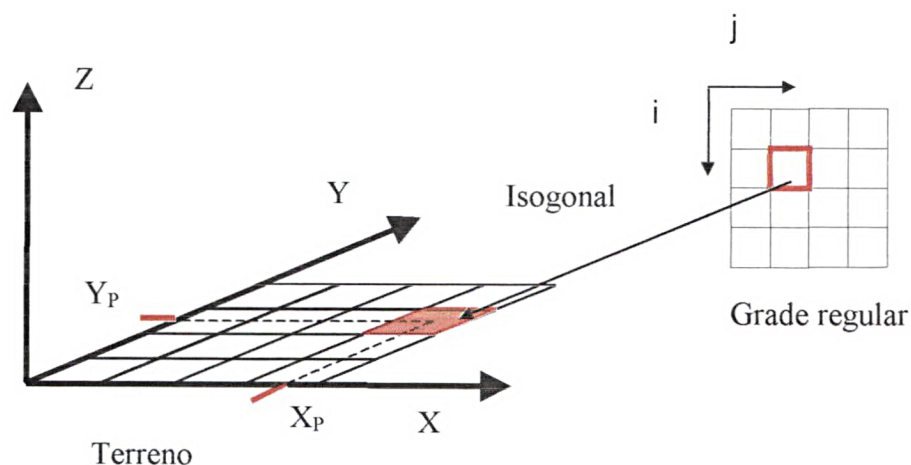


- 3 – Repete-se os passos 1 e 2 até toda a grade estar preenchida.

b) equação de colinearidade

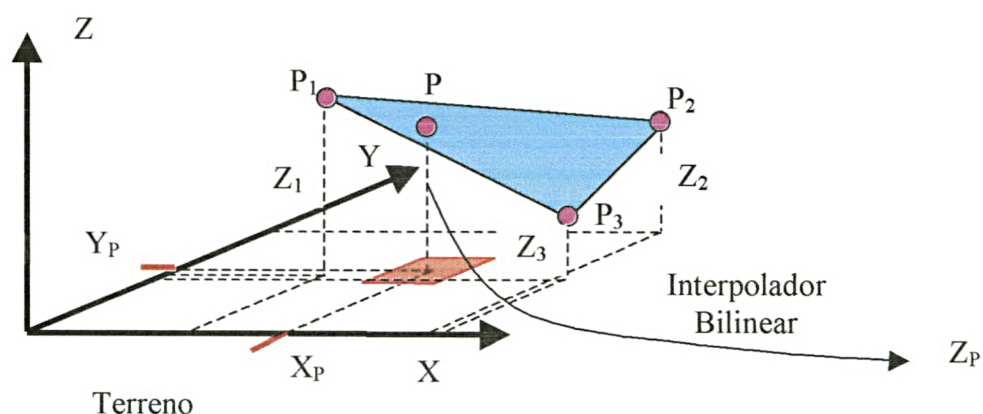
- 1 – Seleciona-se um pixel  $(i,j)$  na grade regular e aplica-se a transformação isogonal (equação 106) sobre este determinando a sua respectiva coordenada planimétrica  $(X_P; Y_P)$ ;

FIGURA 31 : Passo 1 da retificação digital usando a equação de colinearidade



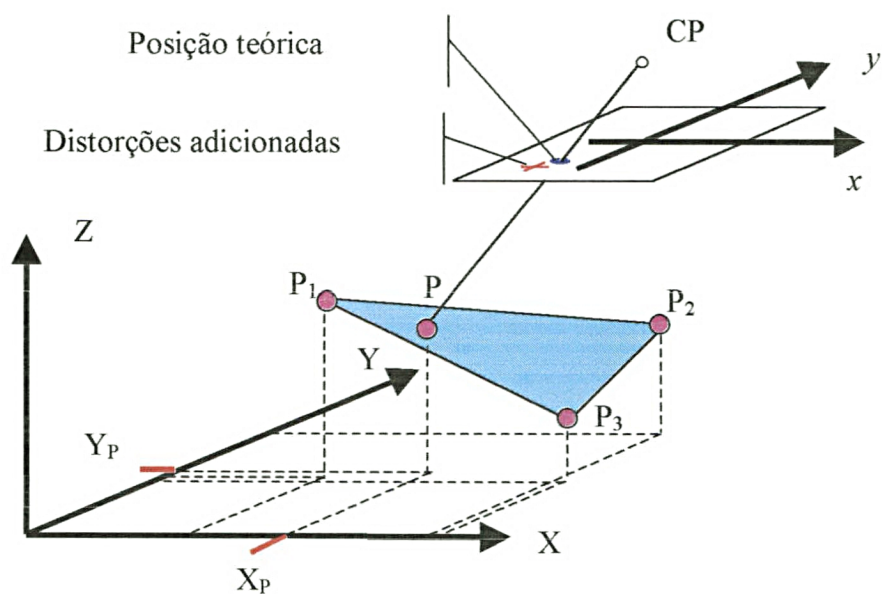
- 2 – Com as coordenadas  $(X_P; Y_P)$  determina-se  $Z_P$  por interpolação a partir do DTM conhecido;

FIGURA 32 : Passo 2 da retificação digital usando a equação de colinearidade



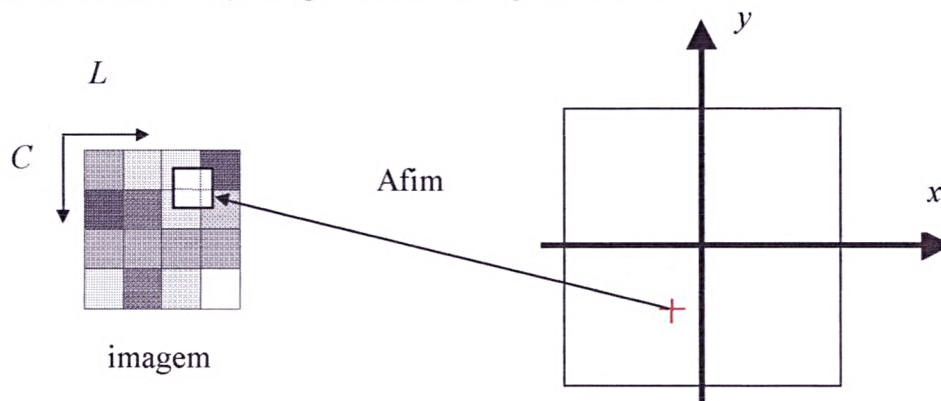
- 3 – Com as coordenadas  $(X_P; Y_P; Z_P)$ , via equação de colinearidade (equação 51) obtém-se a fotocoordenada  $(x_P; y_P)$  do ponto e a esta se acrescenta os erros sistemáticos tratados;

FIGURA 33 : Passo 3 da retificação digital usando a equação de colinearidade



- 4 – Com as fotocoordenadas  $(x_P; y_P)$ , via transformação afim, obtém-se as coordenadas de máquina (pixels).

FIGURA 34 : Passo 4 da retificação digital usando a equação de colinearidade

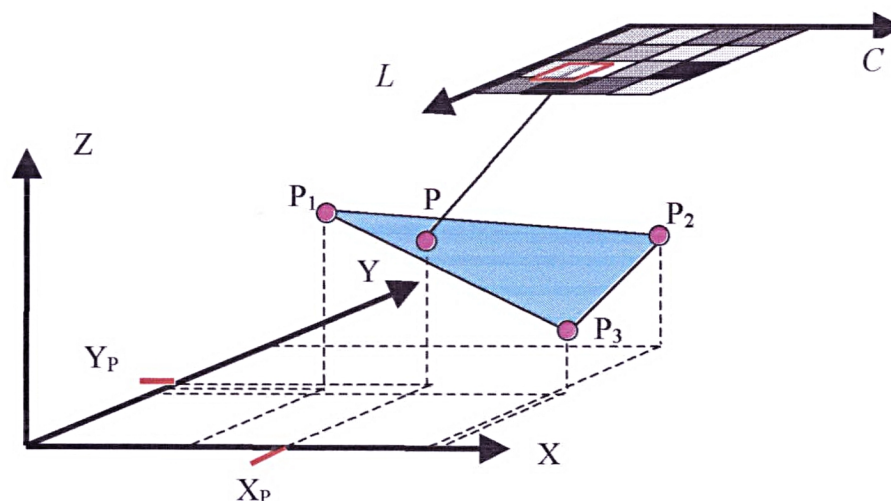


- 5 – Utiliza-se um interpolador e determina-se o tom de cinza a ser colocado na posição  $(i,j)$  da grade;  
 6 – Repete-se os passos de 1 a 5 até toda a grade estar preenchida.

c) equação da DLT

- 1 – Vide passo 1 da colinearidade;  
 2 – Vide passo 2 da colinearidade.  
 3 – Com as coordenadas  $(X_P; Y_P; Z_P)$ , via equação da DLT (equação 56) obtém-se a coordenada de máquina  $(L; C)$  do ponto;

FIGURA 35 : Passo 3 da retificação digital usando a equação a DLT



4 – Utiliza-se um interpolador e determina-se o tom de cinza a ser colocado na posição (i,j) da grade;

5 – Repete-se os passos de 1 a 4 até toda a grade estar preenchida.

De acordo com MITSHITA (1997), basicamente, pode-se interpolar Z utilizando quatro procedimentos matemáticos, a saber : polinômio de 3<sup>o</sup> grau, superfície triangular plana, superfície triangular de 3<sup>o</sup> grau contínua e superfície triangular de 4<sup>o</sup> grau contínua. Os quatro procedimentos foram implementados e testados pelo referido autor, e seus testes apontaram para a superfície triangular de 3<sup>o</sup> grau contínua como sendo a melhor opção.

Entretanto, neste trabalho utilizou-se uma outra forma para interpolar Z. O modelo matemático adotado corresponde ao do interpolador bilinear (ver equação 46), utilizando os três pontos do triângulo cujo ponto a ser interpolado está inscrito.

Para verificar a aplicabilidade do interpolador utilizado efetuou-se seis testes. Tomou-se como base os dados das tabelas 22, 23 , 24, 25, 26 e 27 do MITISHITA (1997). A partir destes dados, calculou-se os valores de Z utilizando o interpolador bilinear e comparou-se os respectivos resultados com os obtidos por MITISHITA (1997). A tabela abaixo mostra os valores obtidos em cada teste.

	Z interpolado (m)		Z Real (m)	Desvio (m)		Fonte dos Dados
	S.T.3 <sup>o</sup> C.	Int. Bilinear		S.T.3 <sup>o</sup> C.	Int. Bilinear	
Teste1	1190,308	1188,426	1200,034	9,726	11,608	Tabela 22, pag 169
Teste2	1200,221	1200,130	1200,034	0,187	0,096	Tabela 23, pag 170
Teste3	1183,248	1183,107	1183,239	0,009	0,132	Tabela 24, pag 173
Teste4	1180,658	1176,457	1183,239	2,581	6,782	Tabela 25, pag 174
Teste5	1186,250	1184,853	1186,286	0,036	1,433	Tabela 26, pag 176
Teste6	953,060	953,827	954,272	1,212	0,445	Tabela 27, pag 178
Média				2,292	3,416	
Desvio Padrão				3,775	4,754	
Obs : S.T.3 <sup>o</sup> C. = Superfície triangular de 3 <sup>o</sup> grau contínua						

Para averiguar se os dois processos são equivalentes comparou-se as médias dos desvios. Como as variâncias populacionais são desconhecidas e admitidas iguais, independentes e normais tem-se :

$$H_0 : \mu_{ST3^{\circ}C} = \mu_{Int. Bilinear}$$

$$H_1 : \mu_{ST3^{\circ}C} \neq \mu_{Int. Bilinear}$$

Para  $\alpha = 5 \%$  e  $v = 10$

$$t_{calc} = 0,66024$$

Como  $-2.2281 < t_{cal} < 2.2281$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

### 3.2.6 Extração das feições

A extração das feições no SIFAR1.0 é feita via monorestituição digital. A fundamentação básica da monorestituição pode ser vista no tópico 2.2.3.5.

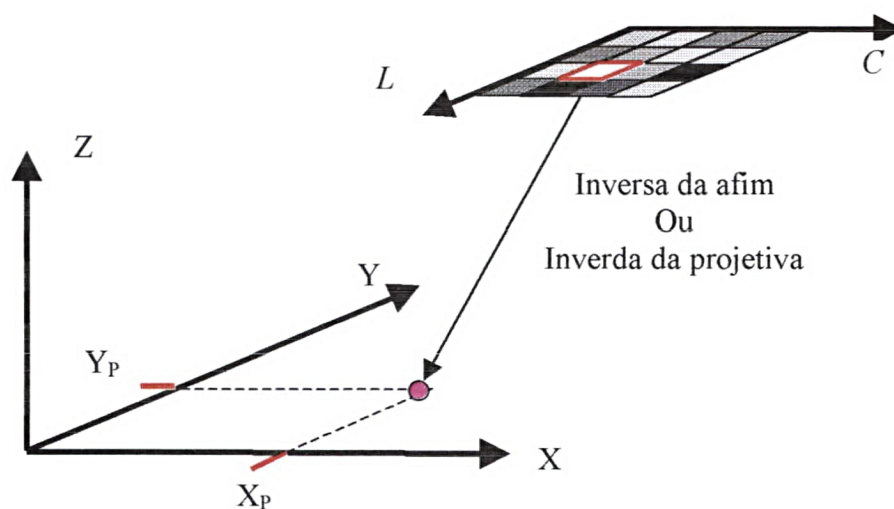
O modelo proposto inicialmente por MAKAROVIC, 1973, consiste em transformar as coordenadas fotogramétricas ( $x_P; y_P$ ), de pontos observados na foto, para o espaço objeto, utilizando-se das equações de colinearidade inversa e de modelamento matemático de superfícies (MDT). Entretanto, variações do modelo inicial podem ser encontradas (MITISHITA, 1997).

Neste trabalho utilizou-se, além do modelo tradicional, as equações projetiva, afim e DLT para digitalizar feições a partir do vídeo. Os passos para efetuar monorestituição para cada equação pode ser visto a seguir :

#### a) transformação afim e projetiva

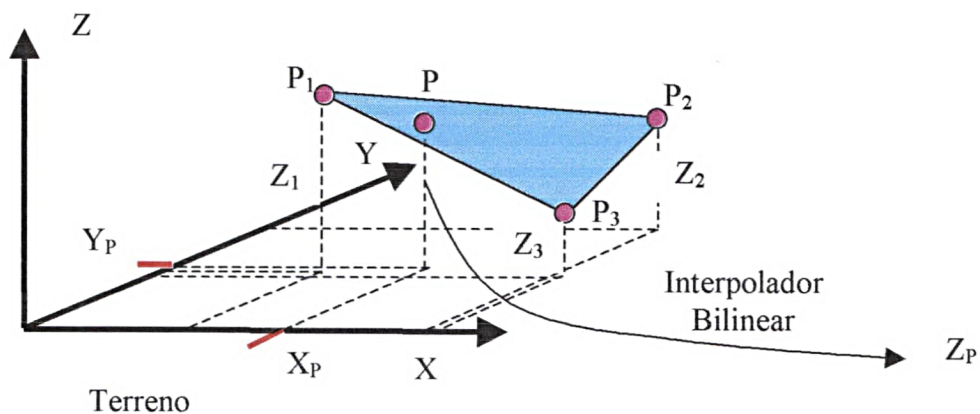
- 1 – Seleciona-se um pixel ( $C, L$ ) em vídeo e aplica-se a transformação afim ou projetiva sobre este levando-o para o espaço objeto. Nesta etapa apenas as coordenadas planimétricas ( $X_P; Y_P$ ) do ponto são determinados;

FIGURA 36 : Passo 1 da monorestituição digital usando a transformação afim ou projetiva



2 – A partir das coordenadas planimétricas do ponto interpola-se  $Z_P$ ;

FIGURA 37 : Passo 2 da monorestituição digital usando a transformação afim ou projetiva



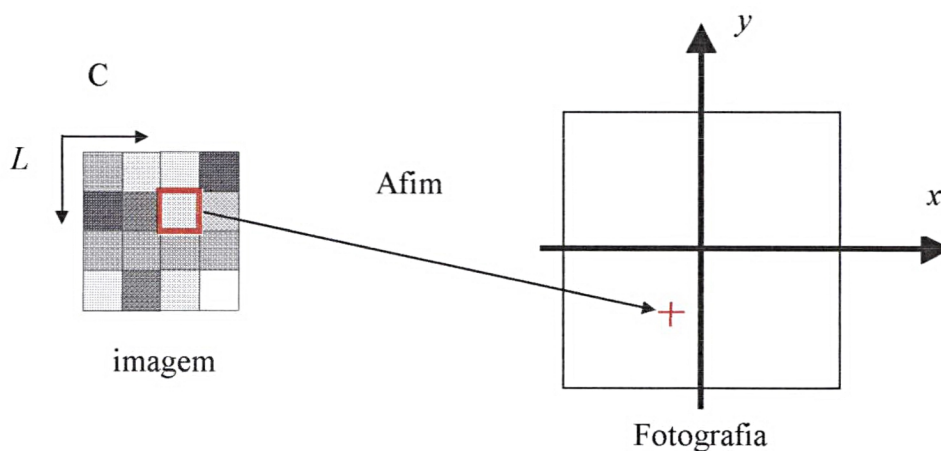
3 – Aplica-se os passos 1 e 2 sobre todas as entidades extraídas.

b) equação de colinearidade

1 – Seleciona-se um pixel  $(C, L)$  em vídeo e via transformação afim transforma-o para o sistema de foto  $(x_P, y_P)$ ;

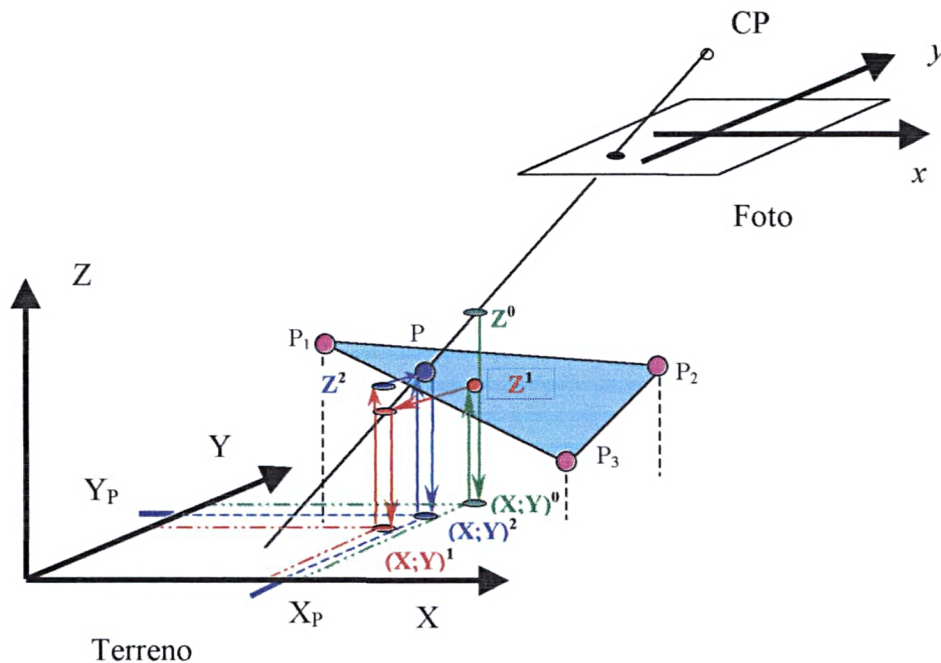


FIGURA 38 : Passo 1 da monorestituição digital usando a equação de colinearidade



- 2 – Depura-se as fotocoordenadas  $(x_P; y_P)$  dos erros sistemáticos;
- 3 – Com as fotocoordenadas  $(x_P; y_P)$  depuradas determina-se as coordenadas do ponto  $(X_P; Y_P; Z_P)$  utilizando a equação inversa de colinearidade (equação 53). A equação inversa da colinearidade requer como argumento, entre outros, a cota do ponto P. Esta variável não é conhecida a princípio, e desta forma o processo deverá ser resolvido por iteração. Para solucionar o problema faz-se :
  - a) adota-se um valor inicial para  $Z_P$ . Geralmente é zero. Uma vez que as informações dos pontos de controle são conhecidas e estão armazenadas, adotou-se efetuar uma interpolação do  $Z_P$  utilizando os três pontos de controle mais próximo via interpolador bilinear. Neste caso, as fotocoordenadas dos pontos e as respectivas cotas associadas, servem como base para os cálculos;
  - b) com o valor de  $Z_P$  inicial determina-se as primeiras coordenadas planimétricas  $(X_P; Y_P)^0$ ;
  - c) Com  $(X_P; Y_P)^0$ , interpola-se um novo  $Z^1$  utilizando o interpolador bilinear;
  - d) Repete-se os passos b e c até que a diferença entre o terno  $(X_P; Y_P; Z_P)$  da penúltima iteração com o da última seja menor do que um valor pré determinado;

FIGURA 39 : Passo 3 da monorestituição digital usando a equação de colinearidade



6 – Aplica-se os passos 1, 2 e 3 sobre todas as entidades extraídas.

c) equação da DLT

1 – Com as coordenadas de máquina ( $L$ ;  $C$ ) do ponto obtém-se a coordenada ( $X_P$ ;  $Y_P$ ;  $Z_P$ ) pela resolução do seguinte sistema de equação :

$$\begin{cases} X(L_1 - LL_9) + Y(L_2 - LL_{10}) = Z(LL_{11} - L_3) + (L - L_0)(K_1' r^2 + 1) - L_4 \\ X(L_5 - CL_9) + Y(L_6 - CL_{10}) = Z(CL_{11} - L_7) + (C - C_0)(K_1' r^2 + 1) - L_8 \end{cases} \quad (112)$$

O sistema requer como argumento, entre outros, a cota do ponto  $P$ . Esta variável não é conhecida a princípio, e desta forma o processo deverá ser resolvido por iteração. Para solucionar o problema faz-se :

- a) adota-se um valor inicial para  $Z_P$ . Geralmente é zero. Uma vez que as informações dos pontos de controle são conhecidas e estão



armazenadas, adotou-se efetuar uma interpolação do  $Z_P$  utilizando os três pontos de controle mais próximo via interpolador bilinear. Neste caso, as fotocoordenadas dos pontos e as respectivas cotas associadas, servem como base para os cálculos;

- b) com o valor de  $Z_P$  inicial determina-se as primeiras coordenadas planimétricas  $(X_P; Y_P)^0$ ;
- c) Com  $(X_P; Y_P)^0$ ; interpola-se um novo  $Z^1$  utilizando o interpolador bilinear;
- d) Repete-se os passos b e c até que a diferença entre o terno  $(X_P; Y_P; Z_P)$  da penúltima iteração com o da última seja menor do que um valor pré determinado;

2 – Aplica-se o passo 1 sobre todos as entidades extraídas.

### 3.2.7 Exportação dxf

A exportação DXF das entidades é feita usando o padrão DXF. Um arquivo DXF é um arquivo tipo texto contendo uma estrutura de dados organizada de tal forma que o AutoCAD possa interpretá-lo. A estrutura básica de organização de um arquivo DXF é a seguinte :

#### a) seção HEADER

As informações gerais sobre o arquivo DXF são encontradas nesta seção. Cada variável de cabeçalho possui um nome e um valor associado.

#### b) seção TABLES

Esta seção contém definições dos seguintes itens :

- *Linetype table* ( LTYPE)
- *Layer table* ( LAYER)

- *Text Style table* ( STYLE)
- *View table* ( VIEW)
- *User Coordinate System table* ( UCS)
- *Viewport configuration table* ( VPORT)
- *Dimension Style table* ( DIMSTYLE)
- *Application Identification table* ( APPID)

#### c) seção BLOCKS

Esta seção contém as definições dos blocos e as descrições das entidades que formam cada bloco.

#### d) seção ENTITIES

Esta seção contém as entidades de desenho ( ponto, reta, círculo, etc.), incluindo referências a alguns blocos.

#### e) END OF FILE

Só contém a string de final de arquivo (EOF) precedida do valor 0 (zero).

Uma estrutura bem simples de um DXF pode ser vista abaixo :

```

0
SECTION
2
HEADER
0
ENDSEC
0
SECTION
2
ENTITIES
0
ENDSEC

```

0

EOF

Nesta estrutura tem-se apenas a seção HEADER e a seção ENTITIES, que são as seções mais importantes para o tipo de exportação executado pelo SIFAR1.0. Como a abordagem completa da estrutura DXF foge do escopo deste trabalho, o mesmo não será tratado.

### 3.3 DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO PROPOSTO

O SIFAR1.0 vem sendo desenvolvido na plataforma de programação DELPHI, o qual gera programas para *windows*. Desenvolveu-se ferramentas básicas para processar imagens, bem como implementou-se algoritmos para calcular os parâmetros da transformação afim no plano, da equação de colinearidade, projetiva e DLT com o objetivo de extrair as feições de interesse sobre a imagem e/ou fazer a retificação da mesma.

O sistema roda em PC AT com memória RAM suficiente para suportar o sistema operacional usado (*Windows*). Aconselha-se o uso de um disco rígido maior do que 400 *MBytes*, devido aos tamanhos dos arquivos das imagens, e uma placa aceleradora de vídeo de 2 *MBytes*.

De forma a facilitar a descrição do sistema SIFAR1.0, na sua primeira versão, será feita uma consideração sobre a forma de se trabalhar os dados. Ainda, que o sistema, em termos de estrutura de programação, não se apresente modular, ou seja, não foram criados módulos para se executar determinadas tarefas, o mesmo será tratado por partes, para facilitar a sua exposição.

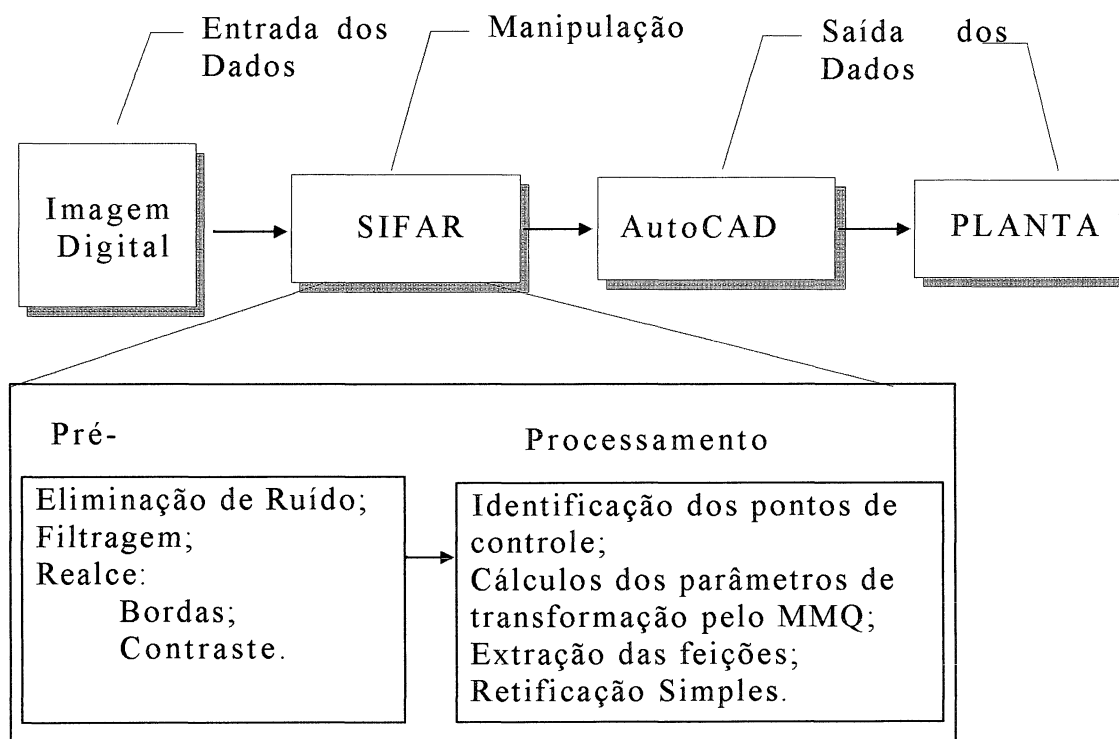
O fluxo dos dados no sistema SIFAR1.0 pode ser generalizado da seguinte forma : Entrada dos dados, Manipulação e Saída dos dados, como mostra o quadro 2.

A entrada dos dados corresponde a abertura, de uma imagem digital no sistema. Essa imagem pode ser proveniente de câmaras digitais ou da digitalização de fotografias. O sistema, por enquanto, permite apenas a abertura de imagens no formato *bitmap* (\*.bmp).

A manipulação dos dados corresponde às etapas de pré-processamento e processamento.

A saída dos dados corresponde à etapa de exportação do arquivo de trabalho para o formato DXF, interpretável pelo AutoCAD. Uma vez exportado os dados, o usuário poderá utilizar as ferramentas disponíveis em tal sistema.

QUADRO 2 : Esquemática do fluxo de dados no SIFAR1.0



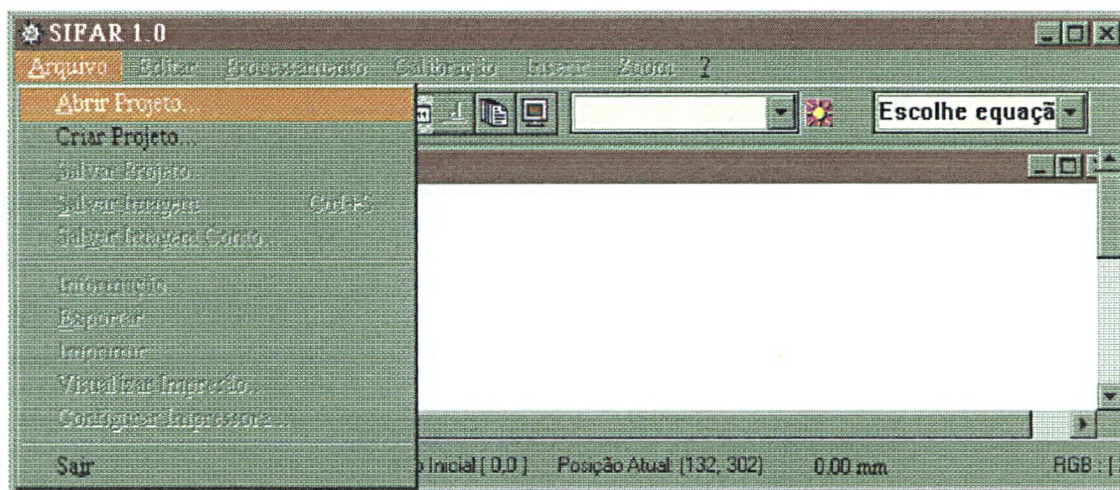
### 3.3.1 Entrada de dados

A entrada das imagens em formato *Bitmap* no SIFAR1.0 se faz por meio do comando **Abrir Projeto** ou **Criar Projeto** que se encontram dentro do comando **Arquivo** no menu principal (Fig. 40).

Selecionado a opção **Abrir Projeto** o usuário deverá escolher um arquivo do tipo **PRJ**, ao qual está associado uma imagem, e dentro da janela secundária desta opção acionar a opção **Ok**. A janela secundária permite a visualização da imagem associada que auxilia o usuário na escolha correta do projeto (Fig. 41). Os arquivos tipo **PRJ** são arquivos já manipulados, ou seja, são arquivos onde o usuário já fez alguma operação com o sistema SIFAR. Caso o usuário for fazer manipulações pela primeira vez sobre uma imagem este

deverá selecionar a opção Criar projeto. Esta opção abrirá a mesma janela secundária da opção anterior com apenas uma diferença, o arquivo a ser escolhido agora é do tipo BMP.

FIGURA 40 : Tela principal do SIFAR1.0 mostrando a opção *Abrir Projeto*.



A opção *Abrir Projeto* pode ser executada também pelo uso do botão de atalho na barra de ferramentas do SIFAR1.0 (Fig 42). Uma vez acionado a figura 41 será mostrada.

FIGURA 41 : Caixa de diálogo da opção *Abrir Projeto*.

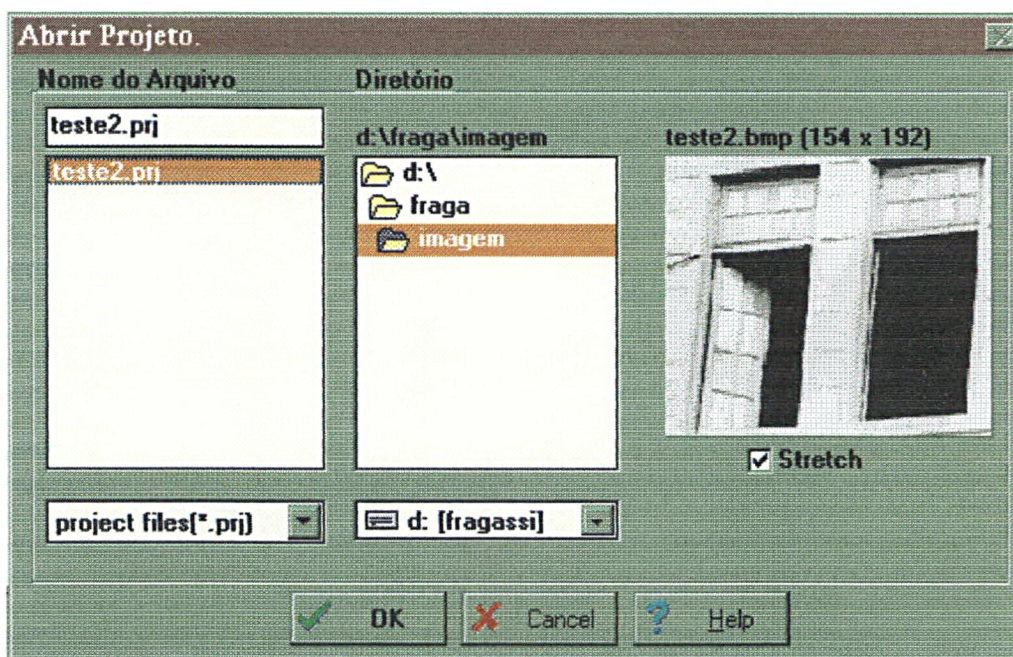




FIGURA 42 : Janela principal do SIFAR1.0 mostrando a Barra de Ferramenta e o Botão de atalho para a opção *Abrir Projeto*.



Ainda que o sistema restrinja a manipulação de imagens apenas arquivos a *Bitmap* (\*.bmp), o usuário poderá ler, indiretamente, outros tipos de formatos. Alguns *softwares* comerciais tais como *Corel* e *Adobe* podem ler imagens de várias extensões, assim, bastaria apenas abrir imagens em outros formatos em tais softwares e salvá-las com formato BMP as quais podem ser lidas pelo SIFAR1.0. Existem também, conversores que podem ser encontrados facilmente e sem custo algum para usuário, que permitem transformar, por exemplo, uma imagem PCX em BMP, ou uma imagem TIF em BMP e desta forma torná-la interpretável pelo SIFAR1.0.

Se a opção for *Criar projeto*, o usuário encontrará a janela abaixo onde deverá entrar algumas informações sobre o projeto a ser criado.

FIGURA 43 : Janela de informações do projeto a ser criado pela opção *Criar Projeto*.

A opção **Ok** da janela acima permite ao usuário abrir um arquivo auxiliar ( \*.aux) no qual constará os dados necessários de entrada . Será feito um comentário mais detalhado posteriormente a respeito deste a arquivo.

### 3.3.2 Manipulação dos dados

A manipulação dos dados compreende as fases de pré-processamento e processamento.

#### 3.3.2.1 Pré-Processamento

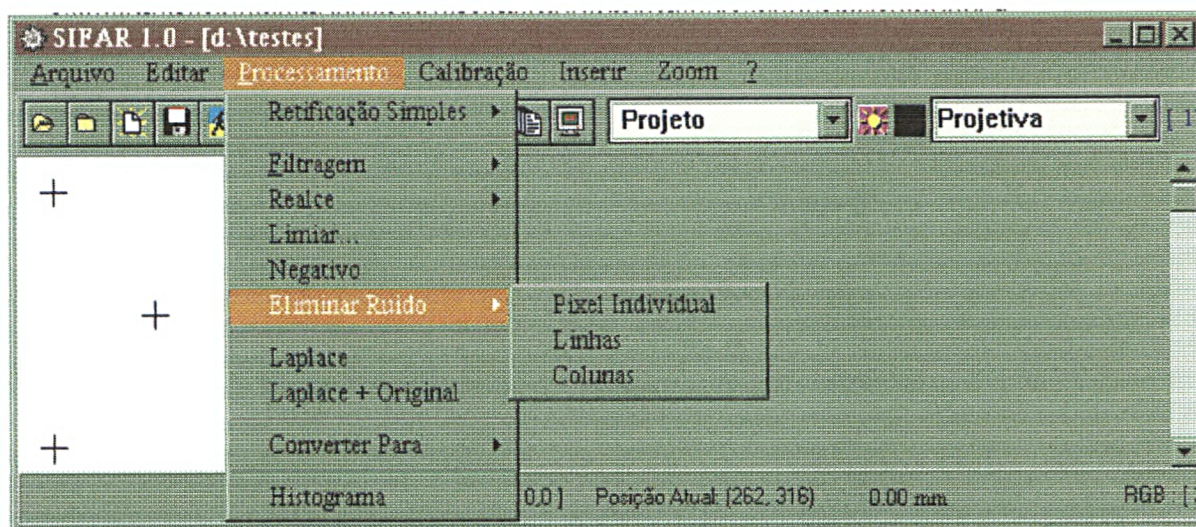
Entende-se por pré-processamento no SIFAR1.0 como todas as operações que antecedem à retirada efetiva de feições arquitetônicas e/ou a obtenção da ortoimagem. Embora seja incluída na fase de pré-processamento a eliminação de ruídos, a concepção em discussão é diferente da idéia de pré-processamento mencionada no tópico 2.1.

O objetivo básico do pré-processamento no SIFAR1.0 é preparar a imagem para que a mesma possa apresentar as informações geométricas mais claras possíveis. Assim, recorre-se às técnicas de tratamento de ruído e de realce para que se possa obter uma boa distinção visual das feições.

Para a supressão dos ruídos foram estudados e implementados os seguintes algoritmos: Supressão de ruído *pixel-a-pixel*; Supressão de linhas de ruído e Supressão de colunas de ruído. Para efetuar essas operações sobre a imagem, o usuário deverá ter um conhecimento sobre ruídos numa imagem digital e como tratá-los, pois o uso indevido desses filtros degradam a imagem. Existindo ruído numa imagem carregada, o usuário deverá dentro da opção **Processamento** no menu principal, escolher **Eliminar Ruído**, e por sua vez, uma das opções dentro desta ( Fig. 44).



FIGURA 44 : A opção Eliminar Ruído no SIFAR1.0.



As operações de filtragem são de extrema importância quando se deseja manipular valores de brilhos de uma imagem. Cada filtro apresenta uma particularidade quando aplicado sobre esta, como foi mostrado no tópico 2.2.2, e o uso deles depende do objetivo do usuário. Abaixo são apresentadas as descrições dos algoritmos de filtragem implementados

Filtro da Média: Filtro que torna o valor de brilho do *pixel* central igual à média aritmética entre ele e seus vizinhos. Causa uma suavização sobre a imagem, eliminando ruídos.

Filtro da Moda: Torna o valor de brilho do *pixel* central igual ao valor mais frequente na vizinhança, ou seja, o valor da moda. Também suaviza a imagem.

Filtro da Mediana: Também suaviza a imagem tornando o valor de brilho do *pixel* central igual à mediana da vizinhança.

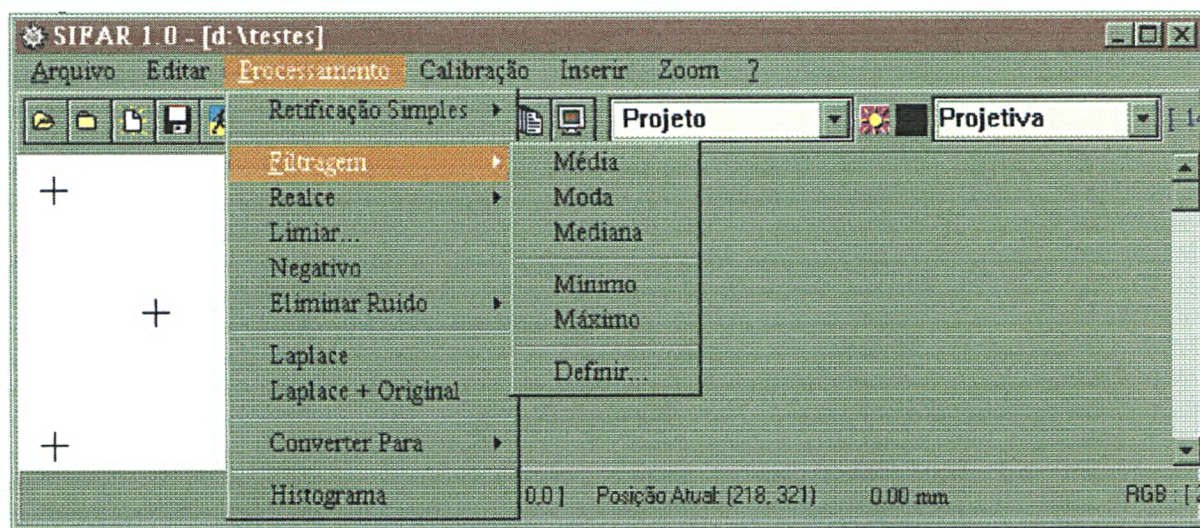
Filtro do Mínimo: Torna o valor de brilho do *pixel* central igual ao menor valor de brilho existente na vizinhança.

Filtro do Máximo: Torna o valor de brilho do *pixel* central igual ao maior valor de brilho existente na vizinhança.

Filtro Personalizado: O usuário define um filtro a ser aplicado sobre a imagem especificando os pesos da máscara e um fator de divisão.

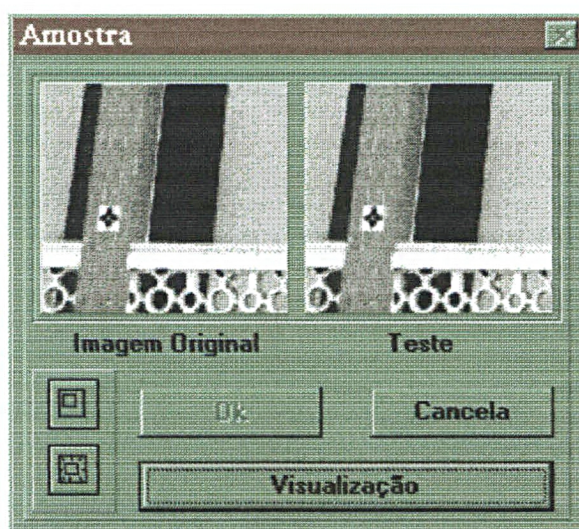
Para o usuário efetuar uma filtragem na imagem deverá escolher, dentro da opção **Processamento**, no menu principal, a opção **Filtragem** e selecionar o filtro desejado (Fig. 45).




FIGURA 45 : Opção *Filtragem* mostrando os filtros disponíveis.

Escolhida uma das opções de filtragem, exceto *Definir*, o usuário terá como resposta uma janela de processamento intermediária, na qual ele poderá ver o efeito da operação escolhida antes de efetuá-la sobre a imagem (Fig. 46). É aconselhável efetuar a operação de filtragem primeiramente numa porção da imagem para ver o efeito, pois tais manipulações exigem muito esforço computacional, e desta forma não corre-se o risco de efetuar uma operação demorada e perceber que o efeito gerado não era aquele esperado.

FIGURA 46 : Janela para visualização do efeito do processamento escolhido.





Caso o usuário escolha a opção **Definir...** terá como resposta a janela da figura 47, onde este deverá compor o filtro. O botão  (Tirar Amostra) no canto inferior direito permite visualizar a janela da figura 46.

A manipulação de contraste é outra ferramenta poderosa para realçar feições numa imagem digital. Foram estudadas e implementadas as seguintes técnicas de manipulação de contraste : Aumento de contraste linear, Aumento de contraste linear saturado, Equalização de histogramas e Limiar de nível de cinza.

Para ter acesso às ferramentas de manipulação de contraste, o usuário deverá escolher dentro da opção **Processamento**, no menu principal, a opção **Realce**, e dentro desta o tipo de operação desejada (Fig. 48).

FIGURA 47 : Janela para a opção **Definir**.



Em qualquer uma das opções de manipulação de contraste escolhida, o usuário terá como resposta a figura 46 já mencionada. Especificamente, na opção **Linear com Saturação**, será mostrada uma outra janela secundária onde deverá ser escolhida a percentagem de saturação total a ser aplicada, como mostra a figura 49

FIGURA 48 : Visualização da opção Realce.

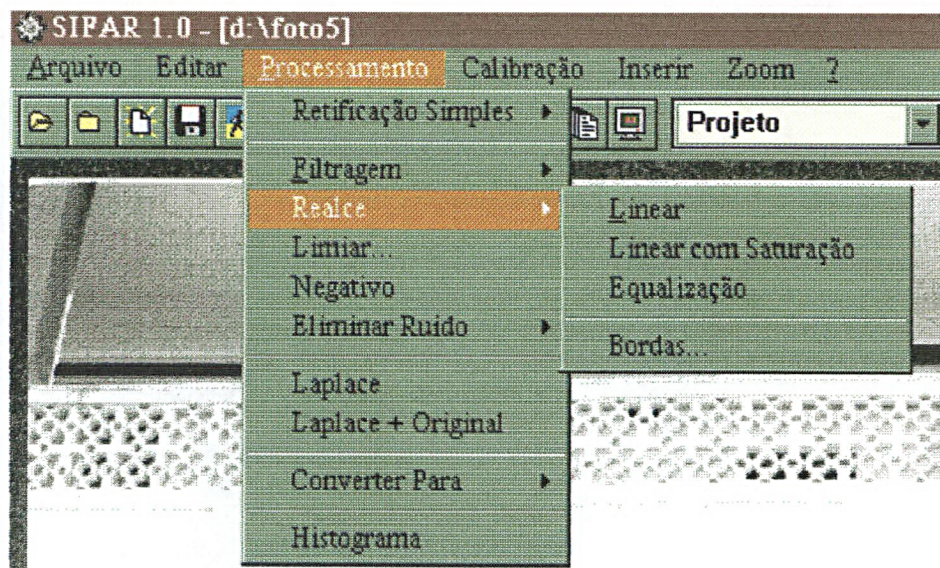
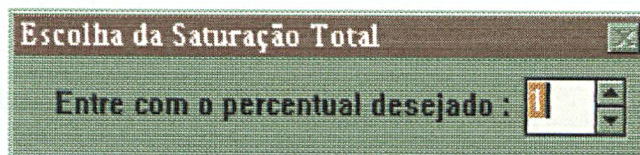



FIGURA 49 : Entrada da percentagem total de saturação.



Dentro da opção *Realce* o usuário encontrará também uma opção chamada *Bordas*, que tem como objetivo realçar bordas em direções pré-definidas (Fig. 50). Dentro desta janela deverá ser indicado também o tipo de filtro de bordas a ser usado, se *Sobel* ou *Prewitt*. O botão  (Tirar Amostra) no canto superior direito permite a visualização da janela da figura 46.

A opção *Processamento* exibe outras opções além daquelas já mostradas, são elas : *Limiar*, *Negativo*, *Laplace*, *Laplace + Original*, *Converter Para* e *Histograma*.

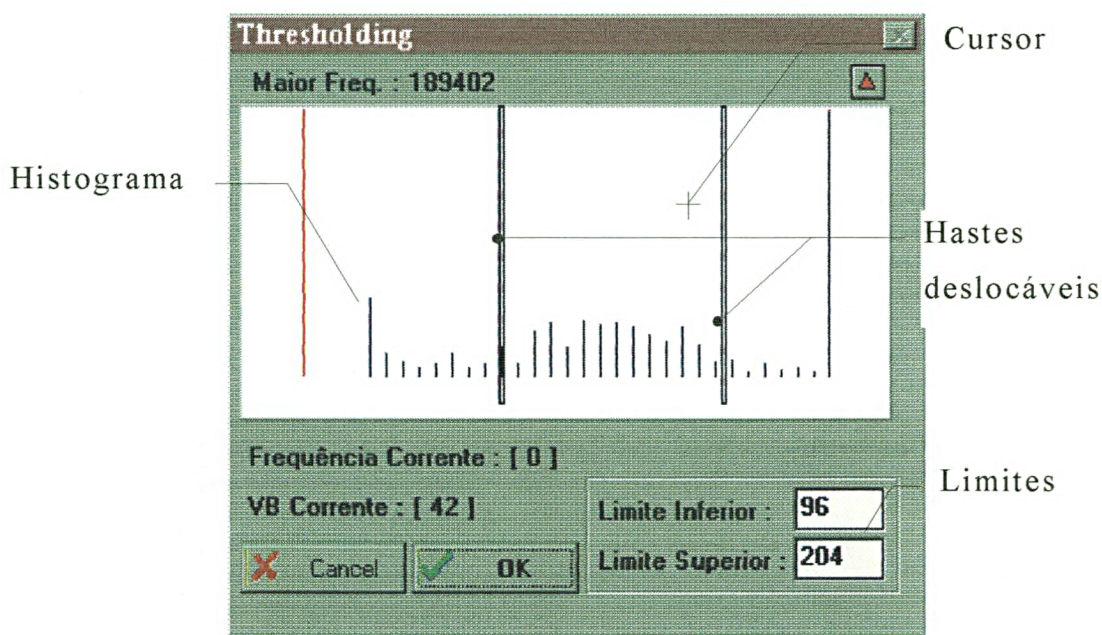


FIGURA 50 : Janela da opção **Bordas** com direção Sul em destaque e filtro de Sobel escolhido.



A opção **Limiar** executa a operação de *thresholding* sobre a imagem em consonância com o explicado no tópico 2.2.1.4 . Seleccionada esta opção, o usuário terá como resposta a janela da figura 51. A janela do *thresholding* exhibe, entre outras coisas, o histograma da imagem, campos dos limites inferior e superior, cursor e duas hastes deslocáveis que delimitam os limites.

FIGURA 51 : Janela da opção Limiar.



As hastes deslocáveis servem para definir os limites, para tal basta clicar em cima de uma das hastes e arrasta-la para a posição desejada. A medida que se desloca a haste, o campo **VB Corrente** exhibe o valor de brilho associado à posição da haste, e ao mesmo tempo a **Frequência Corrente** exhibe a frequência do VB exibido.

A opção *Negativo* encontra o negativo de uma imagem. Ao ser selecionada exibirá a janela da figura 46 já mencionada.

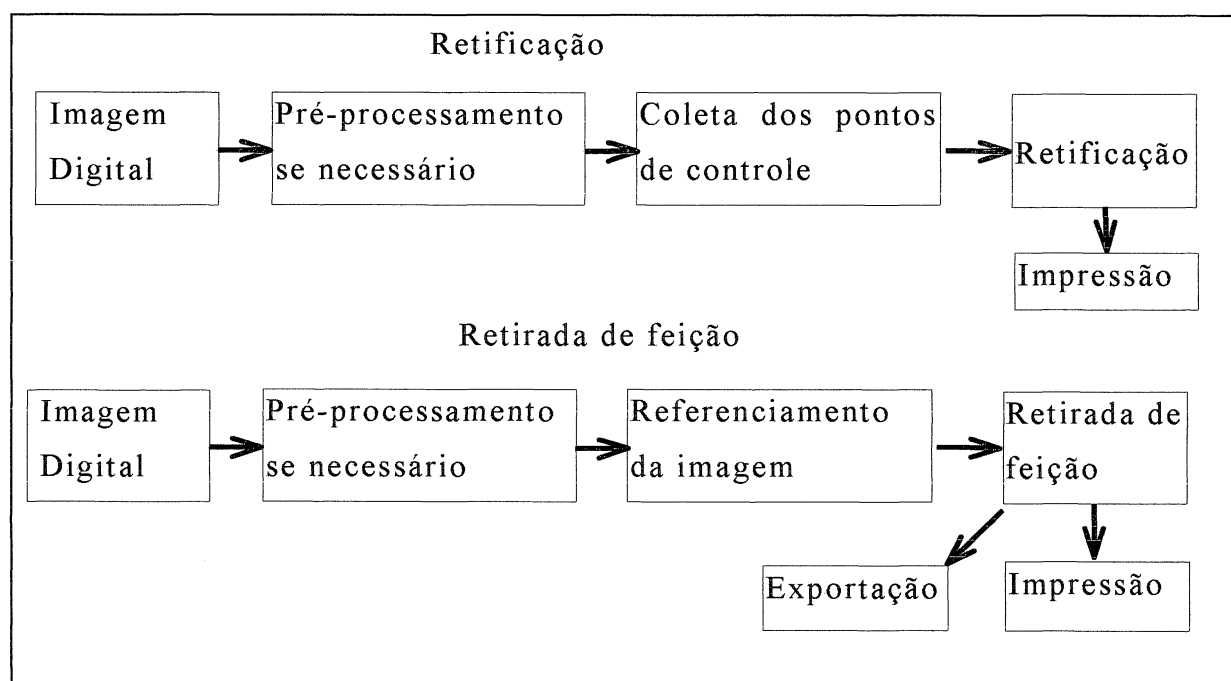
As opções *Laplace* e *Laplace + Original*, são tipos de filtros de realce de bordas que foram implementados separadamente. Ao serem selecionadas, ambas exibirão a janela da figura 46 já mencionada.

### 3.3.2.2 Processamento

O processamento consiste na fase de identificação dos pontos de controle na imagem digital, obtenção das suas coordenadas de tela, cálculos dos parâmetros das transformações e equações, coleta das feições e geração do arquivo vetorial ou pictorial retificado.

A princípio, não existe uma ordem de como deverão ser feitas as operações de processamento. Entretanto, a fase de identificação dos pontos de controle antecede a retificação ou o referenciamento da imagem. A vetorização das feições pode ser feita antes ou depois da seleção dos pontos de controle. Entretanto, para melhor esclarecimento destes itens, as etapas de retiradas de feições e retificação, serão abordadas como mostram os esquemas do quadro 3.

QUADRO 3 : Visualização do fluxo de dados no SIFAR1.0



### 3.3.2.2.1 Execução da Retificação no SIFAR 1.0

Seguindo os passos mostrados no esquema acima, a primeira necessidade é ter uma imagem aberta na tela principal do SIFAR 1.0. O comando para abertura de uma imagem já foi explicado em item anterior.

O pré-processamento é a etapa seguinte a abertura da imagem. Caso a imagem necessite ser tratada o usuário pode executá-la. Os comandos para efetuar as operações de tratamento de imagem já foram abordados anteriormente.

Pontos de controle são pontos localizados na imagem de entrada devidamente referenciados a um sistema de coordenadas. A seleção dos pontos de controle é a fase principal da retificação simples, pois sua escolha afeta o resultado. O SIFAR1.0 permite ao usuário, com o auxílio do *mouse* e ferramentas de zoom identificar os Pontos de controle para o sistema. Uma vez identificados, o sistema calcula os parâmetros da transformação escolhida pelo Método dos Mínimos Quadrados.

Durante a coleta dos pontos de controle existe uma sequência de passos internos ao programa que fica oculto ao usuário, ou seja : seleção dos pontos, cálculo dos parâmetros e retificação. O usuário não terá a visão separada destes itens, pois ao selecionar a opção destinada à retificação terá uma idéia de unicidade. Quando se dá a abertura de um projeto no SIFAR1.0 o sistema carrega os parâmetros da última equação manipulada. Entretanto, pode-se, após carregar um projeto, calcular os parâmetros para as demais equações. Se um projeto é iniciado então o sistema pedirá o arquivo auxiliar (\*.aux) que contém dados dos pontos de controle. A estrutura do arquivo auxiliar é dividido em duas partes : cabeça e corpo. A cabeça tem a seguinte estrutura :

Nome do projeto

Local

Responsável

Data

Resolução da imagem

$\kappa$   $\phi$   $\omega$  (valores iniciais para os ângulos de rotação)

$X^c$   $Y^c$   $Z^c$  (coordenadas iniciais do centro perspectivo)

$K_1$  ( valor inicial para  $K1$ )

$x_o$   $y_o$   $f$   $A$   $B$  ( valores iniciais para ponto principal, distância focal e parâmetros de não ortogonalidade)

NP CódigoC ( número de pontos levantados e código)

um exemplo seria :

```
Tese
UFV
Fragassi
01/03/98
200
0 0 0
80 100 120
0
0 0 60 0 0
13 1
```

A estrutura do corpo pode ser dividida em duas partes, a parte dos pontos levantados e a parte de estatísticas. O valor do CódigoC é quem determina a estrutura do corpo. Se o valor do CódigoC for 1 indica que a parte1 do corpo tem coordenadas no espaço imagem ( pixels) caso contrário elas estão ausentes e o CódigoC assume valor 0. Se o usuário carrega um arquivo aux cujo CódigoC é 0, implica que as coordenadas de imagem deverão ser entradas utilizando ferramentas do sistema SIFAR1.0.

A estrutura da parte 1 com CódidoC igual a 1 é:

```
Codigo1 Código2 Xpixel Ypixel DP DP Xfot Yfot DP DP Xcampo Ycampo Zcampo
DP DP DP
```

A estrutura da parte 1 com CódidoC igual a 0 é:

```
Codigo1 Código2 Xfot Yfot DP DP Xcampo Ycampo Zcampo DP DP DP
```

QUADRO 4 : valores dos códigos do arquivo AUX

Símbolo	Valores	Significado
Código1	0 ou 1	0 : ponto de checagem 1 : ponto de controle
Código2	0 ou 1	0 : não tem fotocoordenada 1 : tem fotocoordenada
Xpixel	Inteiro	valor X em pixel
Ypixel	Inteiro	valor Y em pixel
Xfot	Real	valor X em mm
Yfot	Real	valor Y em mm
Xcampo	Real	valor X em m
Ycampo	Real	valor Y em m
Zcampo	Real	valor Z em m
DP	Real	desvio padrão

Cada linha da parte1 corresponde a um ponto levantado. Um exemplo com o CódigoC igual a 1 seria :

1 1 20 302 1 1 -36.9971 47.9920 1 1 6.0000 196.0000 0.0000 1 1 1

com CódigoC igual a 0 :

1 0 20 302 1 1 6.0000 196.0000 0.0000 1 1 1

O número de pontos especificado na cabeça indica quantas vezes a estrutura acima descrita se repetirá.

Na linha seguinte ao final da parte1 são colocado dois novos códigos que se relacionam com a parte2 do corpo, Código1 e Código2. O primeiro código informa se a parte2 está presente ou não no arquivo aux. O segundo código informa qual equação será usada. O segundo código pode assumir os seguintes valores:



QUADRO 5 : valores dos códigos do arquivo AUX

Símbolo	Valores	Significado
Código1	0 ou 1	0 : não tem estatística
		1 : tem estatística
Codigo2	0	Ajustamento com DLT
	1	Ajustamento com projetiva
	2	Ajustamento com colineridade
	3	Ajustamento com afim

Se o valor do código1 for 1 os seguintes dados deverão compor a parte de estatística :  
parâmetros

Signa a posteriori

parte inferior da matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados.

Um exemplo completo de um arquivo tipo AUX pode ser visto no anexo 1.

As coordenadas do espaço imagem são inseridas dando um clique sobre o ponto de controle na imagem. O requerimento mínimo de Pontos de controle para efetuar a retificação com uma dada equação deve ser atendido, caso contrário o sistema não executará a operação. O sistema possibilita a retirada dos Pontos de controle com um auxílio de zum, onde o usuário poderá fazer a pontaria com maior definição. A figura 55 mostra a janela de auxílio de zum, onde o usuário poderá ver a região em torno do cursor ampliada de um fator escolhido pelo mesmo.

Na figura 52 pode-se observar uma coluna chamada **V/I** onde serão aceitos apenas os números 1 ou 0. Estes números indicam ao sistema se um determinado ponto deve ou não ser utilizado nos cálculos dos parâmetros. O número 1 indica que o ponto entra nos cálculos. Os pontos que estiverem com 0 (Zero) na coluna **V/I** não farão parte da massa de dados que gerarão os parâmetros, entretanto tais pontos serão utilizados para determinar a precisão do ajustamento. Poderão ser coletados até trinta pontos sobre a imagem para determinar os parâmetros das equações implementadas, entretanto, no geral, permite-se coletar até sessenta pontos.

Nota-se também na figura 52 um botão chamado **Processar** e um Objeto para selecionar a equação desejada. O campo chamado **Inserir Estudo de ACP** permite ao usuário

inserir no relatório uma análise dos parâmetros ajustados utilizando a técnica de componentes principais.

FIGURA 52 : Janela para entrada de dados na opção *Criar projeto*.

Pontos	x-Pixel	y-Pixel	X - Campo	Y - Campo	Z - Campo	V/I	Desvios
1	86	76	500,2239	101,2978	475,6903	1	0,0715
2	395	75	503,4291	101,1893	474,6929	0	0,0272
3	695	77	506,6179	101,2060	473,7011	1	0,0200
4	995	75	509,7894	101,1903	472,7875	0	0,3019

☐ Inserir Estudo de ACP    EMQ (Geral): 10,31 cm  
☐ Analisar Distâncias    EMQ (PT): 15,61 cm    Sigma Posterior: 87,9904  
    EMQ (PC): 14,36 cm

Transformação:  
☒ DLT  
☐ Projetiva  
☐ Colinearidade  
☐ Afim

Processar  
 Cancel

O botão **Processar** executa o cálculo dos parâmetros da transformação escolhida e o armazena. O usuário pode calcular os demais parâmetros para as outras equações. Tais parâmetros serão armazenados de forma distinta permitindo a seleção de uma ou de outra equação para gerar a retificação. A escolha da equação desejada na retificação pode ser efetuada também pela seleção da mesma na barra de ferramentas numa caixa de seleção (Figura 53). Se a equação selecionada não tiver sido calculada o usuário poderá então processá-la escolhendo o seguinte caminho : *Calibração /Processar...*. Se a equação escolhida conter dados o usuário poderá ver sua estatística dando um duplo clique sobre o nome da equação selecionada ou escolhendo o caminho *Calibração /Emitir Relatório/ Tela*.

O usuário poderá alterar o peso de um dado ponto de apoio, pesos dos pontos de apoio ou o valor do sigma a priori durante o ajustamento. Para tal basta acionar com o botão direito do mouse sobre a janela da figura 52 onde um menu instantâneo aparecerá com as opções colocadas anteriormente.

FIGURA 53 : Janela da opção Retificação Simples.





Para executar uma retificação o usuário deve selecionar a opção **Processamento** e dentro desta a opção **Retificação...**. Esta opção exibe três novas opções que correspondem aos interpoladores implementados. O usuário tem que optar por uma delas ( Fig. 54)

FIGURA 54 : Janela da opção Retificação Simples.



Escolhido um dos interpoladores, tem-se como resposta a janela da figura 46.

Obedecido o requerimento mínimo de Pontos de controle o usuário deverá clicar a opção **Ok** na caixa de diálogo para executar a retificação.

Uma vez retificada a imagem, o usuário poderá mandar imprimi-la, por meio da opção **Imprimir** ou **Visualização de Impressão**, ambas dentro da opção **Arquivo**. Estas opções podem ser ativadas na barra de ferramentas por 1 e 2, respectivamente (Fig. 56) .

FIGURA 55 : Janela de auxílio de zum na retirada de Pontos de controle .

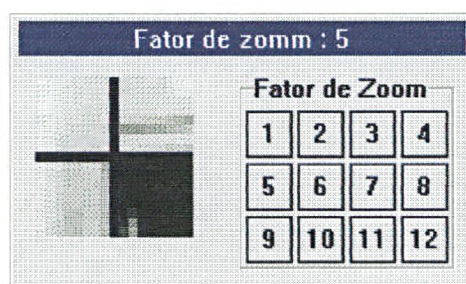


FIGURA 56 : Botões de atalho para imprimir ou visualizar impressão na barra de ferramentas



Selecionado o botão de atalho 2 tem-se como resposta uma nova tela principal, ver figura 57, onde o usuário poderá alterar propriedades tais como : formato do papel, margens, escala, etc.

FIGURA 57 : Janela de visualização de impressão do SIFAR 1.0



### 3.3.2.2.2 Retirada de feição no SIFAR 1.0

A coleta das feições arquitetônicas é necessária quando se deseja ter como saída um arquivo vetorial interpretável pelo AutoCAD. Para tal, ferramentas de desenhos com algumas primitivas estão disponíveis e o tratamento das feições por níveis de informações é permitido.

De um modo geral pode-se dizer que as duas primeiras etapas da retirada de feições correspondem às duas primeiras etapas da retificação simples já comentadas.

A terceira etapa, o referenciamento da imagem, é bastante semelhante à etapa de coleta de pontos de controle na retificação. A diferença básica entre elas é o objetivo. Enquanto na retificação se gera uma imagem retificada ao ser finalizada, no referenciamento gera-se uma imagem referenciada, ou seja, não há processamento sobre os *pixels* da imagem para levá-los para uma posição específica. Basicamente, o que ocorre é a aplicação da equação de colinearidade sobre as coordenadas da imagem, a medida que se move sobre esta ou se retira uma feição.

O referenciamento de uma imagem fica automaticamente estabelecido quando se determina os parâmetros de uma das equações. O usuário poderá notar o referenciamento pela

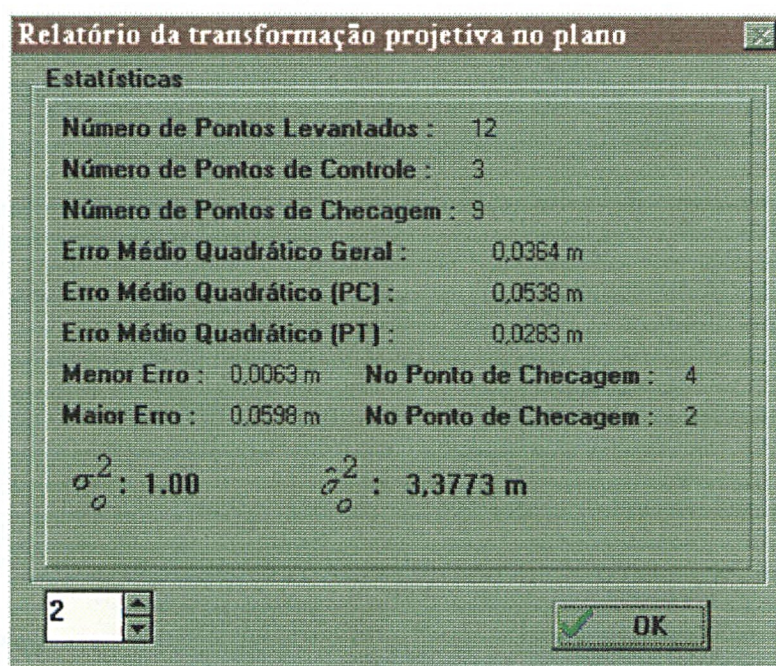


presença de um campo na barra de ferramenta onde a coordenada (X,Y, Z) do espaço objeto respectiva à posição do cursor é mostrada a medida que este se movimenta.

A coleta dos Pontos de controle ou a abertura de um arquivo AUX são feitos de forma idêntica ao procedimento comentado na retificação.

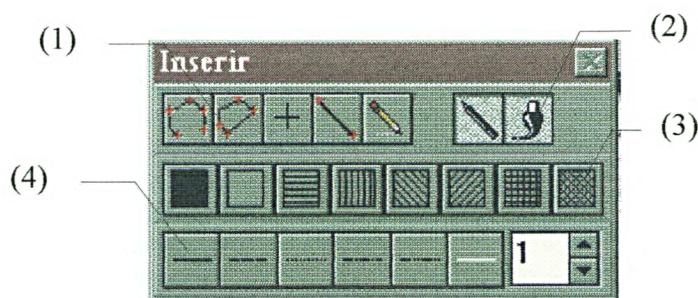
O SIFAR1.0 permite ao usuário verificar a precisão global, a precisão utilizando apenas os pontos de checagem e a precisão utilizando apenas os pontos de controle da equação escolhida, para tal basta seguir os passos descritos anteriormente. A escolha da opção mencionada exhibe a tela da figura 58

FIGURA 58 : Janela para verificar a estatística do ajustamento.



O próximo passo é a retirada efetiva da feição. Para tal o SIFAR 1.0 traz entidades programadas para auxiliar nesta tarefa, ver figura 59. As ferramentas de desenho tanto podem ser acessada do menu principal como da caixa de ferramentas. Para tornar a caixa visível o usuário deve clicar no botão de atalho na barra de ferramentas ou ativar a opção *Visualizar/Esconder Ferramentas* na opção *Editar*.

FIGURA 59 : Caixa de ferramentas para desenho



A caixa de ferramentas tem duas partes distintas : as ferramentas de desenho propriamente ditas, (1) na figura 59, e dois botões que dão acesso a operações específicas sobre o objeto desenhado, (2) na figura 59. Os quadros 6 e 7 correspondem às descrições das ferramentas mostradas na figura 59.



#### QUADRO 6 : Descrição das ferramentas de desenho em (1)

Obs.: utilizar o botão esquerdo do mouse para definir os pontos.

Símbolo	Descrição
	<b>Poligonal fechada.</b> Deve-se fornecer os pontos da poligonal com o botão esquerdo do mouse. Terminada a definição dos pontos encerra-se a operação com um clique no botão direito do mouse. O SIFAR 1.0 permite criar polígonos fechados com até 50 pontos.
	<b>Poligonal aberta.</b> Deve-se fornecer os pontos da poligonal com o botão esquerdo do mouse. Terminada a definição dos pontos encerra-se a operação com um clique no botão direito do mouse. O SIFAR 1.0 permite criar polígonos abertos com até 50 pontos.
	<b>Linha.</b> Deve-se clicar num ponto e permanecer com o botão esquerdo do mouse pressionado, arrastando o cursor sobre a imagem. A orientação e tamanho do segmento de reta ficam determinados pela posição do cursor no momento que o botão esquerdo é liberado.
	<b>Ponto.</b> Deve-se clicar num ponto.
	<b>Desenho a mão livre.</b> Clicar num ponto e arrastar o cursor.

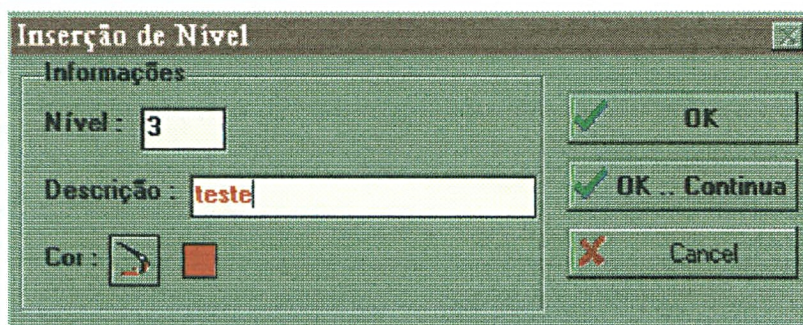


QUADRO 7 : Descrição das ferramentas em (2)

Símbolo	Descrição
	<b>Tipo de traço.</b> Ao ser clicado exibe a parte (3) da figura 59, onde se pode seleccionar seis tipos de traços diferentes e dez espessuras distintas.
	<b>Tipo de preenchimento.</b> Ao ser clicado exibe a parte (4) da figura 59, onde se pode seleccionar oitos tipos de preenchimentos distintos.

Para que o usuário possa retirar as feições é necessário criar os níveis de informações onde serão inseridas as mesmas, caso contrário será adotado o nível *default* do sistema. Para inserir um nível de informação deve-se escolher a opção **Inserir** no menu principal e dentro desta a opção **Nível**. Seleccionada esta última, o sistema fornece a janela da figura 60 onde se deve informar o número, nome e cor do nível.

FIGURA 60 : Janela de criação de níveis de informações.

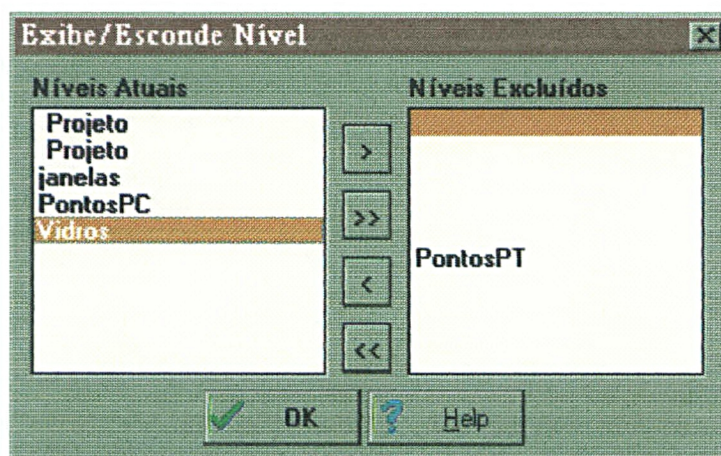


A opção **Ok... Continua** permite criar os demais níveis, enquanto a opção **Ok** finaliza a criação de níveis. Para inserir a cor do nível deve-se clicar no botão ao lado da palavra cor e seleccionar uma cor dentro da caixa de cores. O nome e o número dos níveis são digitados em seus respectivos campos. O SIFAR1.0 permite a criação de até 255 níveis de informações, e a cor escolhida para cada nível corresponderá à cor com que os elementos contidos neles serão visualizados.

Quando se tem muitos níveis exibidos na tela, pode-se optar por esconder aqueles níveis que não possuem mais objetos a serem inseridos, ou simplesmente esconder algum de particular interesse. Para tal, o SIFAR1.0 permite ao usuário efetuar essa operação por meio da escolha da opção **Visualizar / Esconder Níveis...** dentro da opção **Editar**. Ao ser

selecionada tem-se a janela da figura 61, na qual o usuário poderá escolher os níveis a serem escondidos.

FIGURA 61 : Janela de seleção dos níveis a serem escondidos.



Outra forma para esconder níveis de informação é clicar sobre o ícone que mostra o *status* de visibilidade de um nível. A cada clique a visibilidade muda. A escolha do nível de inserção se faz na caixa de seleção de níveis na barra de ferramentas. Junto a esta caixa se encontram dois ícones, um que mostra a visibilidade e outro que exhibe a cor (figura 62).

FIGURA 62 : Caixa de seleção dos níveis de inserção dos objetos.



As propriedades dos níveis de informações podem ser alteradas mesmos depois que eles tenham sido criados. Esta operação é pertinente devido a dinâmica do processo de

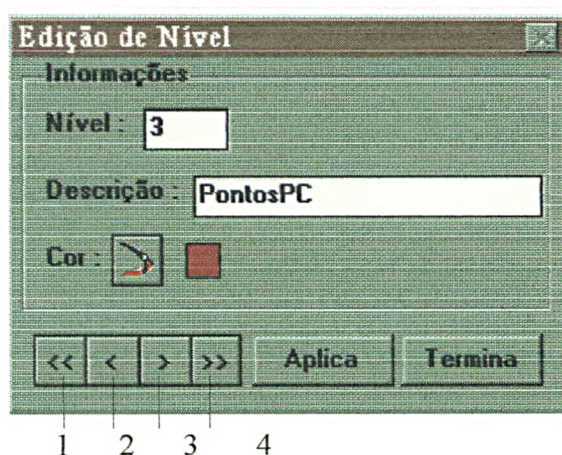


retirada de feições. Para alterar alguma das propriedades dos níveis o usuário deverá selecionar a opção *Nível...* dentro da opção *Editar*. Selecionada a opção *Nível...*, o usuário tem como resposta a janela da figura 63, onde deverá fazer as devidas alterações.

O botão 1 vai para o primeiro nível, o botão 2 decresce de um nível, o botão 3 aumenta de um nível e o botão 4 vai para o último nível.

Para se efetuar as modificações sobre um nível é necessário a cada alteração clicar no botão *Aplica*. O botão *Termina* finaliza a operação de edição dos níveis.

FIGURA 63 : Janela para edição dos níveis.



Se o usuário desejar alterar apenas o nome de um nível ele poderá fazê-lo na caixa de seleção (figura 62), para tal basta dar um duplo clique sobre o nome do nível. O sistema exibirá uma caixa de pergunta onde o usuário deverá inserir o novo nome. Para alterar a cor basta dar um duplo clique sobre o ícone de cores e uma caixa de cores será aberta.

### 3.3.3 Saída dos dados

Todas as entidades retiradas na imagem são armazenadas em um arquivo de extensão PRJ tipo texto.

O arquivo PRJ é dividido em três partes : um cabeçalho, uma seção de dados e uma seção de entidades.

O cabeçalho contém as seguintes informações :

Nome do projeto

*Path* da imagem associada ao projeto

Responsável

Data

Resolução

Número de pontos levantados

A seção de dados contém as mesmas informações do corpo do arquivo AUX.

A seção de entidades começa na linha contendo o nome NIVEIS. A partir desse ponto são armazenadas os objetos criados no sistema. Os níveis são armazenados seguindo a seguinte regra :

NC ( número total de níveis criados excluindo o nível default)

N R G B Nome ( número do nível, componentes R G B da cor, nome)

e terminam antes da palavra ENDCAB.

NIVEIS (início das declarações dos níveis)

4 (número de níveis)

0 0 0 0 Projeto (nível 0, componentes RGB da sua cor e seu nome)

1 0 0 255 Porta1 (nível 1, componentes RGB da sua cor e seu nome)

2 0 255 0 Porta2 (nível 2, componentes RGB da sua cor e seu nome)

3 255 0 0 Janela1 (nível 3, componentes RGB da sua cor e seu nome)

ENDCAB (fim da declarações de níveis)

Cada entidade possui características que devem ser armazenadas para recompor o projeto posteriormente. Existem dois grupos de propriedades que a define, a saber : geral e específica.

As propriedades gerais são aquelas comuns a todas entidades, são elas: Tipo, Nível de inserção, Espessura do traço, Tipo do traço e Tipo de Hachura.

As propriedades específicas são aquelas exclusivas de cada entidade, por exemplo, enquanto um retângulo normal fica determinado por dois de seus vértices opostos, uma circunferência fica determinada por seu centro e raio. Assim, para cada entidade deve-se

armazenar os parâmetros definidores da sua própria geometria, que por sua vez são diferentes para cada uma delas.

O registro de uma entidade é feito da seguinte forma :

E N e t h (definidores das propriedades gerais)

XXXXXXXX (definidores das propriedades específicas)

...

onde :

**E** : tipo da entidade;

**N** : número do nível de inserção da entidade;






**e** : número que caracteriza a espessura do traço;

**t** : número que caracteriza o tipo de traço;

**h** : número que caracteriza o tipo de hachura;




**XXXXXXXX** : número que caracteriza os parâmetros definidores da geometria da entidade no SIFAR1.0 .








QUADRO 8 : Valores de E

Símbolo	Nome	E
	Poligonal fechada.	10
	Poligonal aberta.	11
	Linha.	19
	Ponto.	20
	Desenho a mão livre.	22












Os valores de N pertencem ao intervalo [0, 1, ..., 255].

QUADRO 9 : Valores de e









e	Visualização
1	
2	
3	

4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	






QUADRO 10 : Valores de t

Símbolo	Nome	Exemplo	t
	Contínuo		0
	Tracejado		1
	Pontilhado		2
	Traço-ponto		3
	Traço dois ponto		4
	Invisível		5

QUADRO 11: Valores de h

Símbolo	Nome	h
	Preenchido	0
	Transparente	1
	Hachura horizontal	2
	Hachura vertical	3
	Hachura Diagonal \	4
	Hachura Diagonal /	5
	Quadriculado normal	6
	Quadriculado diagonal	7

QUADRO 12 : Esquema de XXXXXXXX

Símbolo	Nome	XXXXXXXX
	Poligonal fechada.	n X do ponto1 Y do Ponto1 ... X do ponto n Y do Ponto n
	Poligonal aberta.	n X do ponto1 Y do Ponto1 ... X do ponto n Y do Ponto n
	Linha.	X do ponto1 Y do Ponto1 X do ponto2 Y do Ponto2
	Ponto.	X do ponto1 Y do Ponto1
	Desenho a mão livre.	n X do ponto1 Y do Ponto1 ... X do ponto n Y do Ponto n

Um exemplo de seção de entidades pode ser visto abaixo :

```

ENDCAB
2 3 1 1 1 { E N e t h }
320 205
50
10 3 1 1 1 { E N e t h }
5
20 20
20 30
150 30
100 10
50 5
ENDSEC

```

Um exemplo completo de um arquivo tipo PRJ pode ser visto no anexo 2. O usuário de posse do arquivo tipo PRJ poderá editá-lo em um editor de texto e desta forma alterar o projeto.

Durante a fase de implementação do SIFAR1.0 notou-se que qualquer entidade que possui-se espessura maior do que 1, aceitava somente o tipo de traço contínuo.

A exportação do projeto para DXF é feita escolhendo a opção **Exportar** dentro da opção **Arquivo**. O sistema criará um arquivo DXF com o mesmo nome do projeto. A partir do AutoCAD o usuário poderá carregá-lo.

Algumas simplificações foram feitas na geração do arquivo DXF. Todas as entidades são exportadas com uma única espessura ( $e = 1$ ), com traço contínuo ( $t = 1$ ), sem hachuras e em uma única cor. Os respectivos níveis são mantidos.



## 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para a retificação e extração de feições são apresentados neste capítulo.

### 4.1 AVALIAÇÃO DA PRECISÃO

O estudo de avaliação, para todas as imagens, se fará pela observância do erro médio quadrático (EMQ) bem como do erro relativo percentual (ERP). Assim, quanto menor o EMQ e/ou ERP maior a precisão do levantamento.

A avaliação das imagens selecionadas foram feitas, a princípio, analisando o EMQ e o ERP para uma configuração de pontos pré-determinada, sendo esta opção a mais correta para avaliar o comportamento dos modelos matemáticos. Entretanto, durante os testes notou-se que a geometria da distribuição dos pontos influenciava os resultados. Tal fato já tinha sido alertado por alguns autores pesquisados. Assim, realizou-se testes com pontos fixos e não fixos com o intuito de avaliar as duas possibilidades.

No caso dos testes com pontos não fixos, a escolha da melhor configuração de pontos de apoio para a determinação dos parâmetros de uma dada equação, foi obtida utilizando a seguinte metodologia :

- 1 - Executou-se o ajustamento com todos os pontos de apoio disponíveis;
- 2 - Encontrou-se o ponto de maior desvio, eliminou-se o mesmo do ajustamento e anotou-se o valor do sigma a posteriori;
- 3 - Executou-se novamente o ajustamento e observou-se o novo valor do sigma a posteriori. Se a exclusão do ponto tendenciou o valor do sigma na direção da unidade, então a exclusão foi correta, se não o ponto deverá retornar a compor o ajustamento e um outro ponto deverá ser escolhido para a exclusão;
- 4 - Os passos 2 e 3 foram repetidos até se obter um valor de sigma a posteriori mais próximo possível de 1.

Esse procedimento, seguramente, não é o mais correto, pois o ideal seria fazer uma análise da matriz variância-covariância (MVC) dos pontos ajustados e identificar aqueles que são correlacionados e eliminá-los do ajustamento ou aplicar um algoritmo para detecção de

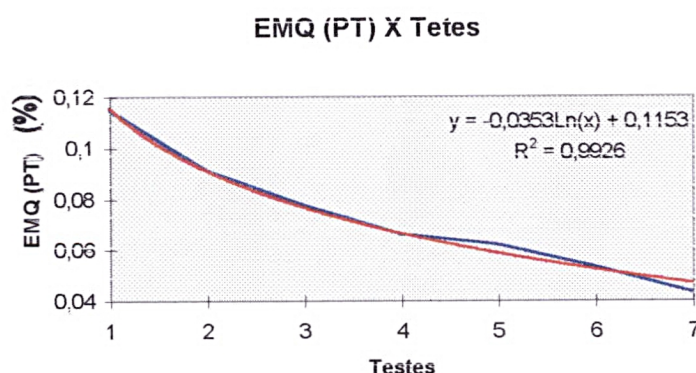
erros grosseiros. Entretanto, na falta de uma rotina para calcular tanto a MVC dos pontos como para investigar erros, optou-se por tal procedimento. Durante o processo de testes notou-se que o procedimento adotado, algumas vezes, tornava-se ineficiente. Em especial, para a equação projetiva, fixando os pontos de apoio dos extremos e selecionando alguns internos a estes, o resultado do ajustamento era melhor do que aquele obtido via procedimento. Entretanto, a justificativa do uso do procedimento exposto pode ser vista nas tabelas e figuras seguintes.

TABELA 8 : Testes para a escolha da configuração ideal para a equação afim

Parâmetro	TESTES						
	1	2	3	4	5	6	7
Pontos Elim.	Nenhum	1	1;12	1;12;4	1;12;4;5	1;12;4;5;11	1;12;4;5;11;3
NPT	12	11	10	9	8	7	6
NPC	0	1	2	3	4	5	6
GL	18	16	14	12	10	8	6
$\hat{\sigma}_0^2$	53,5534	33,6953	24,325	16,9413	14,6901	11,2287	6,9777
EMQ (geral)	0,099	0,1118	0,1069	0,1068	0,1087	0,1117	0,1147
EMQ (PT)	0,1144	0,0909	0,0774	0,066	0,0617	0,0531	0,043
EMQ (PC)	0	0,2887	0,2182	0,1922	0,1751	0,1663	0,1594
EV médio	0,07266	0,055719	0,067504	0,059957	0,05812	0,067135	0,06537
ERP	2,083394	1,607402	1,955173	1,731066	1,671024	1,916469	1,870861

Percebe-se na tabela anterior que a exclusão sucessiva do ponto de maior desvio em cada teste faz com que o sigma a posteriori tenda para 1. Quando o sigma diminui o EMQ (PC) e o EMQ (PT) também diminuem, isso implica numa melhoria da modelagem.

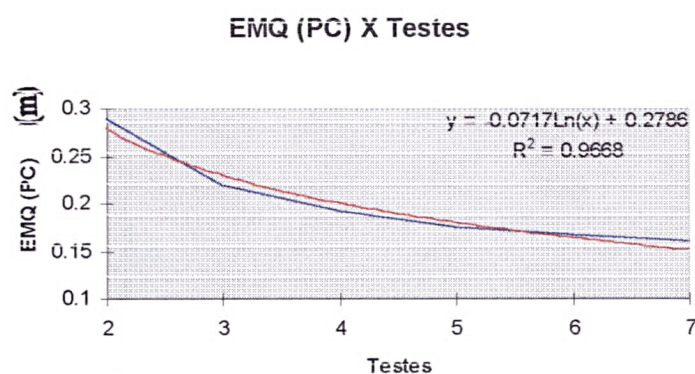
FIGURA 64 : Comportamento do EMQ (PT) para cada teste





Observando os valores de EMQ (PT) e EMQ (PC) nota-se que os valores caem a cada teste e a tendência da curva gerada se enquadra numa curva logarítmica decrescente. O comportamento destes dados podem ser visualizados nas figuras 64 e 65.

FIGURA 65 : Comportamento do EMQ (PC) para cada teste



O comportamento do EV médio e do ERP não sofrem uma queda sucessiva como ocorre nos dois parâmetros anteriores. Os valores flutuam em torno de uma possível média. Contudo, há uma queda entre os valores iniciais e finais, como mostram os dois gráficos seguintes.

FIGURA 66 : Comportamento do ERP para cada teste

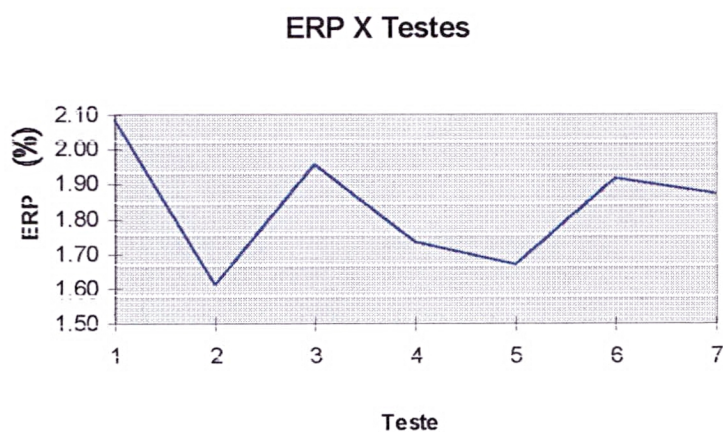
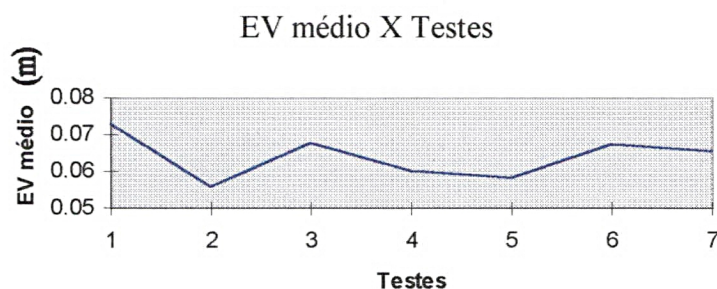


FIGURA 67 : Comportamento do EV médio para cada teste



Se for efetuado o mesmo teste para a equação da DLT tem-se a seguinte tabela :

TABELA 9 : Resultados dos testes aplicados sobre a DLT

Parâmetro	TESTES						
	1	2	3	4	5	6	7
Pontos Elim.	Nenhum	1	1;12	1;12;4	1;12;4;5	1;12;4;5;11	1;12;4;5;11;3
NPT	12	11	10	9	8	7	6
NPC	0	1	2	3	4	5	6
GL	12	10	8	6	4	2	0
$\hat{\sigma}_0^2$	956,8892	476,5123	1493,7306	6,352	6,2766	20,4401	?
EMQ (geral)	5,1361	28,7778	4,9885	0,0986	4,542	14,3414	?
EMQ (PT)	7,2635	44,5824	3,6793	0,0426	0,0734	0,0682	?
EMQ (PC)	0	0,1462	11,0561	0,1926	7,8668	22,2175	?
EV médio	0,246761	11,025567	2,187955	0,04	0,05975	0,1521104	?
ERP	7,170907	328,596	63,24789	1,1624	1,7111641	4,408195	?

Pode-se notar que as exclusões dos mesmos pontos não conduziram a uma resposta satisfatória. Assim, fica claro que cada equação requer um tratamento separado.

O problema do procedimento adotado pode ser visto tabela 10 .

No teste 1 fixou-se os pontos extremos (1;4;9;10) e escolheu-se alguns pontos internos. Neste teste, a eliminação de pontos , excluindo os fixos, foi executada seguindo o procedimento adotado. No teste 2 não fixou-se pontos, e os pontos foram eliminados de acordo com o procedimento adotado. Pode-se notar que há uma diferença entre os testes, entretanto a magnitude da diferença entre os parâmetros EMQ (geral), EMQ (PT), EMQ (PC), EV médio e ERP não são significativos. Para averiguar se os dois processos são equivalentes efetuou-se testes estatísticos.

TABELA 10 : Resultados obtidos via equação projetiva fazendo-se uso de dois procedimentos distintos.

Parâmetro	FOTO 4	
	Teste 1	Teste 2
Pontos Elim.	2;3;5;7;11	1;10;11
NPT	7	9
NPC	5	3
GL	6	10
$\hat{\sigma}_0^2$	1.1166	1.03290
EMQ (geral)	0.0327	0.0427
EMQ (PT)	0.018	0.018
EMQ (PC)	0.0486	0.0821
$S^2$ (geral)	0.000431	0.001166
$S^2$ (PT)	0.000034	0.000051
$S^2$ (PC)	0.000134	0.001693
EV médio	0.012992	0.018853
$S^2$ (EV)	0.000066634	0.000239414
ERP	0.373886	0.38168

Inicialmente comparou-se as médias dos desvios (primeiro caso) e depois os EV's médios (segundo caso) dos teste 1 e 2. Como as variâncias populacionais são desconhecidas e admitidas iguais, independentes e normais tem-se :

1º caso :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para  $\alpha = 5 \%$  e  $\nu = 22$

$$t_{\text{calc}} = 0.1293$$

Como  $-2.074 < t_{\text{cal}} < 2.074$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

2º caso :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para  $\alpha = 5 \%$  e  $\nu = 18$

$$t_{\text{calc}} = 0.4897$$

Como  $-2.101 < t_{\text{cal}} < 2.101$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância. Assim, a escolha entre um procedimento ou outro não traz perdas significativas.

#### 4.2 AVALIAÇÃO DA IMAGEM HIPOTÉTICA

A utilização de uma imagem hipotética tem como objetivo básico mostrar a aplicabilidade do SIFAR1.0 para outra finalidade, ou seja, mostrar que o aplicativo pode ser utilizado para extrair feições de fotos aéreas, convencionais ou não, digitalizadas.

A avaliação será feita da seguinte forma :

- a) avaliação do teste seguindo a metodologia proposta;
- b) avaliação do teste com pontos fixos;
- c) comparação entre a e b;
- d) conclusão dos tópicos a, b e c.

Nos tópicos a e b serão observados o EMQ para os pontos de checagem e o ERP, como também será feito um teste estatístico para averiguar, simultaneamente, as três equações. Tal teste será feito utilizando tanto os desvios como o EV. No tópico c a abordagem será feita utilizando apenas uma das equações.

Os dados que serviram como base para as análises se encontram no anexo 5.

##### a) Utilização da metodologia

Adotando a metodologia proposta chegou-se a tabela 11 :

TABELA 11 : Resultados obtidos para a foto hipotética usando a metodologia proposta

Parâmetro	FOTO HIPOTÉTICA			
	Afim	Projetiva	DLT	Colinearidade
Pontos Elim.				
NPT	10	14	14	15
NPC	15	11	11	10
GL	14	20	16	18
$\hat{\sigma}_0^2$	0.562266	1.02522	0.369825	0.145791
EMQ (geral)	9.1971	3.8943	0.5117	0.5739
EMQ (PT)	0.7527	0.9528	0.6138	0.8343
EMQ (PC)	11.8623	5.8002	0.5667	0.4439
$S^2$ (Geral)	47.384824	8.086795	0.055293	0.093153
$S^2$ (PT)	0.067274	0.086795	0.04168	0.106213
$S^2$ (PC)	42.873672	11.149535	0.0742235	0.060072
EV médio	4.1398	2.3523	0.44048	0.4866
$S^2$ (EV)	11.857052	6.094119	0.0943374	0.1354873
ERP	8.2579	4.6921	0.8788	0.9715
Pontos Elim.				
Afim :	2;4;5;9;10;11;12;15;16;17;18;20;21;22;24			
Projetiva :	3;4;6;10;14;15;17;18;22;23;24			
DLT :	4;5;7;9;10;11;12;14;18;23;24			
Colinearidade:	1;5;9;11;13;14;15;17;18;25			

Para averiguar se as equações são equivalentes, efetuou-se testes estatísticos. Inicialmente comparou-se as médias dos desvios (primeiro caso) e depois os EV's médios (segundo caso).

Como as variâncias populacionais são desconhecidas e admitidas iguais, independentes e normais tem-se :

1º caso :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}} = \mu_{\text{Colinearidade}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5\%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	354,7280	24	14,7803339	1,062085337
Entre Colunas	557,1570	3	185,7190101	13,34539794
Residual (Dent.)	1001,9760	72	13,91633363	
Total	1913,8611	99		

O nosso interesse particular é analisar as colunas. Como  $F_{\text{coluna}} = 13,34539794 > F(3,72) = 2.74$ , rejeita-se  $H_0$ , ou seja existe diferença significativa entre as equações aplicadas para esta imagem.

Aplicando o teste de Scheffé para as colunas tem-se :

Equações	$ \bar{X}_{\bullet i} - \bar{X}_{\bullet j} $	$\Delta\alpha$	Conclusão
Afim e Projetiva	3,6975	3,0251	Diferem
Afim e DLT	5,7959	3,0251	Diferem
Afim e Coline.	5,7629	3,0251	Diferem
Projetiva e DLT	2,0983	3,0251	Não diferem
Projetiva e Coline.	2,0654	3,0251	Não diferem
DLT e Coline.	0,0329	3,0251	Não diferem

2º caso :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}} = \mu_{\text{Colinearidade}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5\%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	194,3256	39	4,982707613	1,132567383
Entre Colunas	373,6594	3	124,5531411	28,31087755
Residual (Dent.)	514,7392	117	4,399480053	
Total	1082,7242	159		

Como  $F_{\text{coluna}} = 28,31087755 > F(3,117) = 2.72$ , rejeita-se  $H_0$ , ou seja existe diferença significativa entre as equações aplicadas para esta imagem.

Aplicando o teste de Scheffé para as colunas tem-se :

Equações	$ \bar{X}_{\bullet i} - \bar{X}_{\bullet j} $	$\Delta\alpha$	Conclusão
Afim e Projetiva	1,7878	1,3398	Diferem
Afim e DLT	3,6995	1,3398	Diferem
Afim e Coline.	3,6533	1,3398	Diferem
Projetiva e DLT	1,9117	1,3398	Diferem
Projetiva e Coline.	1,8655	1,3398	Diferem
DLT e Coline.	0,0461	1,3398	Não diferem

## b) Utilizando pontos fixos

Pela observância do EMQ (PC) da tabela 12 pode-se notar que a equação de colinearidade apresenta melhor resultado, seguida da DLT. As equações projetiva e afim apresentam valores altos quando comparadas com às demais.

Tomando-se o ERP como classificador da melhor opção tem-se duas equações, ou seja, a DLT e a colinearidade.

TABELA 12 : Resultados obtidos para a foto hipotética fixando pontos

Parâmetro	FOTO HIPOTÉTICA			
	Afim	Projetiva	DLT	Colinearidade
Pontos Elim.				
NPT	13	13	13	13
NPC	12	12	12	12
GL	20	18	14	14
$\hat{\sigma}_0^2$	83.0387	8.2622	0.1349	0.0000
EMQ (geral)	7.6025	3.6172	0.4633	0.4654
EMQ (PT)	8.6774	3.3200	0.3709	0.4674
EMQ (PC)	7.5938	4.3580	0.6058	0.5690
$S^2$ (Geral)	14.561513	6.304778	0.086262	0.065817
$S^2$ (PT)	17.525438	3.718984	0.019407	0.023364
$S^2$ (PC)	12.589910	8.804118	0.127843	0.101675
EV médio	4.1634	2.2787	0.4009	0.4049
$S^2$ (EV)	11.848238	4.961836	0.101071	0.097218
ERP	8.30	4.54	0.80	0.80
Pontos Elim.				
Afim :	2;4;6;8;10;12;14;16;18;20;22;24			
Projetiva :	2;4;6;8;10;12;14;16;18;20;22;24			
DLT :	2;4;6;8;10;12;14;16;18;20;22;24			
Colinearidade:	2;4;6;8;10;12;14;16;18;20;22;24			

Para averiguar se as equações são equivalentes, efetuou-se testes estatísticos. Inicialmente comparou-se as médias dos desvios das duas equações (primeiro caso) e depois os EV's médios (segundo caso). Como as variâncias populacionais são desconhecidas e admitidas iguais, independentes e normais tem-se :

1º caso :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}} = \mu_{\text{Colinearidade}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5 \%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	144,2145	24	6,008936229	1,201027806
Entre Colunas	650,1317	3	216,7105807	43,31472715
Residual (Dent.)	360,2276	72	5,003161626	
Total	1154,5738	99		

Como  $F_{\text{coluna}} = 43,31472715 > F(3,72) = 2.74$ , rejeita-se  $H_0$ , ou seja existe diferença significativa entre as equações aplicadas para esta imagem.

Aplicando o teste de Scheffé para as colunas tem-se :

Equações	$ \bar{X}_{\bullet i} - \bar{X}_{\bullet j} $	$\Delta\alpha$	Conclusão
Afim e Projetiva	3,9679	1,8139	Diferem
Afim e DLT	6,2564	1,8139	Diferem
Afim e Coline.	6,2280	1,8139	Diferem
Projetiva e DLT	2,2886	1,8139	Diferem
Projetiva e Coline.	2,2601	1,8139	Diferem
DLT e Coline.	0,0285	1,8139	Não diferem

2º caso :

$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}} = \mu_{\text{Colinearidade}}$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5\%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	175,1888	39	4,492020902	1,076712161
Entre Colunas	388,7163	3	129,5720946	31,05770278
Residual (Dent.)	488,1216	117	4,171979349	
Total	1052,0267	159		

Como  $F_{\text{coluna}} = 31,05770278 > F(3,117) = 2.72$ , rejeita-se  $H_0$ , ou seja existe diferença significativa entre as equações aplicadas para esta imagem.

Aplicando o teste de Scheffé para as colunas tem-se :



Equações	$ \bar{X}_{\bullet i} - \bar{X}_{\bullet j} $	$\Delta\alpha$	Conclusão
Afim e Projetiva	1,8847	1,3047	Diferem
Afim e DLT	3,7625	1,3047	Diferem
Afim e Coline.	3,7585	1,3047	Diferem
Projetiva e DLT	1,8778	1,3047	Diferem
Projetiva e Coline.	1,8738	1,3047	Diferem
DLT e Coline.	0,0041	1,3047	Não diferem

Assim, tendo observado tanto o EMQ (PC) como o ERP pode-se concluir que a equação de colinearidade e a DLT foram as que apresentaram melhores resultados, e por tal recomendadas para a finalidade de extração de feições sobre esta imagem hipotética.

### c) Comparação entre os dois procedimentos

Para avaliar o ajuste entre os métodos utilizados em a e b, optou-se por escolher uma das equações e aplicar sobre ela os testes estatísticos. Para tal, escolheu-se a equação de colinearidade, e a análise será feita avaliando o desvio médio (primeiro caso) e o EV médio (segundo caso) dos tópicos a e b.

Como as variâncias populacionais são desconhecidas e admitidas iguais, independentes e normais tem-se :

1º caso :

$$H_0 : \mu_{\text{Procedimento}} = \mu_{\text{Pontosfixos}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Procedimento}} \neq \mu_{\text{Pontosfixos}}$$

Para  $\alpha = 5\%$  e  $v = 48$

$$t_{\text{calc}} = 0,224184$$

Como  $-2.0128 < t_{\text{cal}} < 2.0128$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

2º caso :

$$H_0 : \mu_{\text{Procedimento}} = \mu_{\text{Pontosfixos}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Procedimento}} \neq \mu_{\text{Pontosfixos}}$$

Para  $\alpha = 5\%$  e  $v = 78$

$$t_{\text{calc}} = 0,2874882$$

Como  $-1.9908 < t_{\text{cal}} < 1.9908$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

Assim, a escolha entre um procedimento ou outro não traz perdas significativas.

#### d) Conclusão

Tendo avaliado os testes pode-se concluir :

- A equação afim apresentou os piores resultados. Tanto na situação a como na b ela diferiu das demais equações. Por tal, não é recomendada para extração de feições sobre a imagem em estudo;
- A equação projetiva apresentou resultados superiores ao da afim. Na situação a, primeiro caso, foi equiparada com a equação de colinearidade e DLT. Entretanto, nos outros demais testes notou-se a diferença existente entre esta e as demais. Desta forma, não é recomendada para extração de feições sobre a imagem em estudo;
- A equação DLT e de colinearidade apresentaram os melhores resultados. Nos testes aplicados em a e b foram classificadas como semelhantes. Assim, ambas são recomendadas para extração de feições sobre a imagem em estudo.
- A avaliação do teste c mostra que não existe diferença significativa entre o procedimento adotado e o método da fixação de pontos .
- Pela observância do EMQ (PC) pode-se notar que a equação de colinearidade apresenta melhor resultado, seguida da DLT. As equações projetiva e afim apresentam valores altos quando comparadas com às demais.
- Tomando-se o ERP como classificador da melhor opção chega-se a equação da DLT seguida da equação de colinearidade.

#### 4.3 AVALIAÇÃO DAS FOTOS SELECIONADAS

As avaliações das fotos selecionadas serão feitas da seguintes forma :

- a) avaliação do teste seguindo a metodologia proposta;
- b) avaliação do teste com pontos fixos;
- c) comparação entre a e b;
- d) conclusão dos tópicos a, b e c.

Nos tópicos a e b serão observados o EMQ para os pontos de checagem e o ERP, como também será feito um teste estatístico para averiguar, simultaneamente, as três equações. Tal teste será feito utilizando o EV. Os dados que serviram como base para as análises das fotos 1, 2, 3, 4 e 5 se encontram nos anexos 6, 7, 8, 9 e 10 respectivamente.

#### 4.3.1 Avaliação da foto 1

##### a) Utilização da metodologia

Aplicando a metodologia para a foto 1 tem-se o seguinte resultado :

TABELA 13 : : Resultados obtidos para a foto 1 usando a metodologia proposta

Parâmetro	FOTO 1		
	Afim	Projetiva	DLT
Pontos Elim.	1;3;4;5;11;12	2;48;11;12	4;8
NPT	6	7	10
NPC	6	5	2
GL	6	6	8
$\hat{\sigma}_0^2$	7,5312	2,0006	21,6187
EMQ (geral)	0,1131	0,0853	0,224
EMQ (PT)	0,0448	0,0225	0,0897
EMQ (PC)	0,1568	0,131	0,5339
$S^2$ (Geral)	0,005398	0,004182	0,041709
$S^2$ (PT)	0,000247	0,000037	0,00134
$S^2$ (PC)	0,002897	0,002926	0,197158
EV médio	0,06416	0,047145	0,06411
$S^2$ (EV)	0,002087	0,001932	0,003026
ERP	1,83	1,38	1,88

Para efetuar uma avaliação entre as três equações será utilizado os desvios entre os pontos objetos levantados e os transformados pela aplicação das três equações. Assim, pode-se elaborar as seguintes hipóteses :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5 \%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	0,3141	11	0,028550001	2,510760038
Entre Colunas	0,0156	2	0,007788908	0,684976464
Residual (Dent.)	0,2502	22	0,011371059	
Total	0,5798	35		

O interesse particular é analisar as colunas. Como  $F_{\text{coluna}} = 0,68497646 < F(2,22) = 3,44$ , aceita-se  $H_0$ , ou seja não existe diferença significativa entre as equações aplicadas para esta fotografia.

b) Fixando pontos

TABELA 14 : : Resultados obtidos para a foto 1 fixando pontos

Parâmetro	FOTO 1		
	Afim	Projetiva	DLT
Pontos Elim.	2;4;6;8;10	2;4;6;8;10	2;4;6;8;10
NPT	7	7	7
NPC	5	5	5
GL	8	6	2
$\hat{\sigma}_0^2$	78,6192	6,8969	87,9903
EMQ (geral)	0,1073	0,0553	0,1031
EMQ (PT)	0,1395	0,0429	0,1561
EMQ (PC)	0,1099	0,0789	0,1436
$S^2$ (Geral)	0,002066	0,001429	0,006164
$S^2$ (PT)	0,001228	0,000124	0,001219
$S^2$ (PC)	0,003819	0,002715	0,01324
EV médio	0,06902	0,030387	0,047812
$S^2$ (EV)	0,002029	0,000627	0,00106
ERP	1,97	0,88	1,39

Para a avaliar as três equações tem-se :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5\%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	0,0803	11	0,007299071	6,186757289
Entre Colunas	0,0191	2	0,009530245	8,077919929
Residual (Dent.)	0,0260	22	0,00117979	
Total	0,1253	35		

Como  $F_{\text{coluna}} = 8,07791993 > F(2,22) = 3,44$ , rejeita-se  $H_0$ , ou seja existe uma diferença significativa entre as equações aplicadas para esta fotografia.

Aplicando o teste de Scheffé para as colunas tem-se :

Equações	$ \bar{X}_{\bullet i} - \bar{X}_{\bullet j} $	$\Delta\alpha$	Conclusão
Afim e Projetiva	0,0564	0,036780774	Diferem
Afim e DLT	0,0276	0,036780774	Não diferem
Projetiva e DLT	0,0288	0,036780774	Não diferem

### c) Comparação entre os dois procedimentos

Para avaliar o ajuste entre os métodos utilizados em a e b, optou-se por escolher uma das equações e aplicar sobre ela os testes estatísticos. Para tal, escolheu-se a equação projetiva, e a análise será feita avaliando o desvio médio (primeiro caso) e o EV médio (segundo caso) dos tópicos a e b.

Como as variâncias populacionais são desconhecidas e admitidas iguais, independentes e normais tem-se :

1º caso :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para  $\alpha = 5\%$  e  $v = 22$

$$t_{\text{calc}} = 0,44500398$$

Como  $-2.0739 < t_{\text{cal}} < 2.0739$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

2º caso :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para  $\alpha = 5\%$  e  $v = 18$

$$t_{\text{calc}} = 0,31332243$$

Como  $-2.1009 < t_{\text{cal}} < 2.1009$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

Assim, a escolha entre um procedimento ou outro não traz perdas significativas.

#### d) Conclusão

Tendo avaliado os testes pode-se concluir :

- As três equações se apresentam semelhantes quando se analisa os resultados do teste a. Em b, a equação afim difere da projetiva e da DLT e as duas últimas se apresentam semelhantes;
- A análise do EMQ (PC) e do EV médio apresenta a equação projetiva como a melhor opção tanto em a como em b;
- A avaliação do teste c mostra que não existe diferença significativa entre o procedimento adotado e o método da fixação de pontos.

#### 4.3.2 Avaliação da foto 2

##### a) Utilização da metodologia

Aplicando a metodologia para a foto 2 tem-se o resultado da Tabela 15.

Para efetuar uma avaliação entre as três equações será utilizado os desvios entre os pontos objetos levantados e os transformados pela aplicação das três equações. Assim, podemos elaborar as seguintes hipóteses :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5\%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	0,1004	11	0,00912555	1,083372589
Entre Colunas	0,0323	2	0,016129041	1,914817324
Residual (Dent.)	0,1853	22	0,008423279	
Total	0,3180	35		

TABELA 15 : Resultados obtidos para a foto 2 usando a metodologia proposta

Parâmetro	FOTO 2		
	Afim	Projetiva	DLT
Pontos Elim.	1;2;4;7;8;11;12	2;3;5;6;7;10;11	4;8
NPT	5	5	10
NPC	7	7	2
GL	4	2	8
$\hat{\sigma}_0^2$	0,7805	1,9213	11,5396
EMQ (geral)	0,1400	0,0325	0,1373
EMQ (PT)	0,0157	0,0256	0,0703
EMQ (PC)	0,1832	0,0415	0,3214
$S^2$ (Geral)	0,010809	0,000405	0,014761
$S^2$ (PT)	0,000012	0,000053	0,000916
$S^2$ (PC)	0,008478	0,000303	0,062299
EV médio	0,0779	0,0139	0,0497
$S^2$ (EV)	0,003107	0,000086	0,001710
ERP	2,29	0,40	1,45

Para efetuar uma avaliação entre as três equações será utilizado os desvios entre os pontos objetos levantados e os transformados pela aplicação das três equações. Assim, podemos elaborar as seguintes hipóteses :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5\%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	0,1004	11	0,00912555	1,083372589
Entre Colunas	0,0323	2	0,016129041	1,914817324
Residual (Dent.)	0,1853	22	0,008423279	
Total	0,3180	35		

O nosso interesse particular é analisar as colunas. Como  $F_{\text{coluna}} = 1,914817324 < F_{(2,22)} = 3,44$ , aceita-se  $H_0$ , ou seja não existe diferença significativa entre as equações aplicadas para esta fotografia.

b) Fixando pontos

TABELA 16 : Resultados obtidos para a foto 2 fixando pontos

Parâmetro	FOTO 2		
	Afim	Projetiva	DLT
Pontos Elim.	2;4;6;8;10	2;4;6;8;10	2;4;6;8;10
NPT	7	7	7
NPC	5	5	5
GL	8	6	2
$\hat{\sigma}_0^2$	50,5735	5,8682	97,1418
EMQ (geral)	0,0933	0,0471	0,1170
EMQ (PT)	0,1258	0,0435	0,1950
EMQ (PC)	0,0906	0,0646	0,1589
$S^2$ (Geral)	0,001020	0,001031	0,007840
$S^2$ (PT)	0,001242	0,000149	0,002082
$S^2$ (PC)	0,000936	0,002234	0,016711
EV médio	0,0704	0,0259	0,0585
$S^2$ (EV)	0,001817	0,000439	0,001652
ERP	2,05	0,75	1,70

Para efetuar uma avaliação entre as três equações será utilizado os desvios entre os pontos objetos levantados e os transformados pela aplicação das três equações. Assim, podemos elaborar as seguintes hipóteses :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5\%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	0,0677	11	0,006154702	3,291470203
Entre Colunas	0,0193	2	0,00967401	5,17355935
Residual (Dent.)	0,0411	22	0,001869895	
Total	0,1282	35		

O nosso interesse particular é analisar as colunas. Como  $F_{\text{coluna}} = 5,17355935 > F(2,22) = 3,44$ , rejeita-se  $H_0$ , ou seja existe uma diferença significativa entre as equações aplicadas para esta fotografia.

Aplicando o teste de Scheffé para as colunas tem-se :



Equações	$ \bar{X}_{\bullet i} - \bar{X}_{\bullet j} $	$\Delta\alpha$	Conclusão
Afirm e Projetiva	0,0525	0,046304921	Diferem
Afirm e DLT	0,0074	0,046304921	Não diferem
Projetiva e DLT	0,0450	0,046304921	Não diferem

### c) Comparação entre os dois procedimentos

Para avaliar o ajuste entre os métodos utilizados em a e b, optou-se por escolher uma das equações e aplicar sobre ela os testes estatísticos. Para tal, escolheu-se a equação projetiva, e a análise será feita avaliando o desvio médio (primeiro caso) e o EV médio (segundo caso) dos tópicos a e b.

Como as variâncias populacionais são desconhecidas e admitidas iguais, independentes e normais tem-se :

1º caso :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para  $\alpha = 5\%$  e  $v = 22$

$$t_{\text{calc}} = 0,40050556$$

Como  $-2.0739 < t_{\text{cal}} < 2.0739$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

2º caso :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para  $\alpha = 5\%$  e  $v = 18$

$$t_{\text{calc}} = 0,11795472$$

Como  $-2.1009 < t_{\text{cal}} < 2.1009$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

Assim, a escolha entre um procedimento ou outro não traz perdas significativas.

### d) Conclusão

Tendo avaliado os testes pode-se concluir :

- As três equações se apresentam semelhantes quando se analisa os resultados do teste a. Em b, a equação afim difere da projetiva e da DLT e as duas últimas se apresentam semelhantes;
- A análise do EMQ (PC) e do EV médio apresenta a equação projetiva como a melhor opção tanto em a como em b;
- A avaliação do teste c mostra que não existe diferença significativa entre o procedimento adotado e o método da fixação de pontos.

#### 4.3.3 Avaliação da foto 3

##### a) Utilização da metodologia

Aplicando a metodologia para a foto 3 tem-se os seguinte resultado :

TABELA 17 : Resultados obtidos para a foto 3 usando a metodologia proposta

Parâmetro	FOTO 3		
	Afim	Projetiva	DLT
Pontos Elim.	1;5;7;8;9;11;12	1;11	2;4;8;10
NPT	5	10	8
NPC	7	2	4
GL	4	12	4
$\hat{\sigma}_0^2$	22,4887	1,2700	18,0236
EMQ (geral)	0,4135	0,0321	0,2121
EMQ (PT)	0,0901	0,0219	0,1105
EMQ (PC)	0,5393	0,0688	0,3589
$S^2$ (Geral)	0,077751	0,000493	0,037791
$S^2$ (PT)	0,000657	0,000058	0,001352
$S^2$ (PC)	0,042847	0,000364	0,108105
EV médio	0,2522	0,0137	0,0585
$S^2$ (EV)	0,025847	0,000188	0,003159
ERP	7,32	0,39	1,72

Para efetuar uma avaliação entre as três equações será utilizado os desvios entre os pontos objetos levantados e os transformados pela aplicação das três equações. Assim, podemos elaborar as seguintes hipóteses :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5\%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	0,3609	11	0,032805125	0,788326127
Entre Colunas	0,5481	2	0,274041579	6,585377724
Residual (Dent.)	0,9155	22	0,041613646	
Total	1,8244	35		

O nosso interesse particular é analisar as colunas. Como  $F_{\text{coluna}} = 6,58537772 > F(2,22) = 3,44$ , rejeita-se  $H_0$ , ou seja existe diferença significativa entre as equações aplicadas para esta fotografia.

Aplicando o teste de Scheffé para as colunas tem-se :

Equações	$ \bar{X}_{.i} - \bar{X}_{.j} $	$\Delta\alpha$	Conclusão
Afim e Projeção	0,2918	0,218442168	Diferem
Afim e DLT	0,2142	0,218442168	Não diferem
Projetiva e DLT	0,0776	0,218442168	Não diferem

b) Fixando pontos

TABELA 18 : Resultados obtidos para a foto 3 fixando pontos

Parâmetro	FOTO 3		
	Afim	Projetiva	DLT
Pontos Elim.	2;4;6;8;10	2;4;6;8;10	2;4;6;8;10
NPT	7	7	7
NPC	5	5	5
GL	8	6	2
$\hat{\sigma}_0^2$	411,8830	3,2105	26,9264
EMQ (geral)	0,3102	0,0435	0,0971
EMQ (PT)	0,3741	0,0320	0,1012
EMQ (PC)	0,3449	0,0627	0,1435
$S^2$ (Geral)	0,014845	0,000954	0,006571
$S^2$ (PT)	0,014006	0,000071	0,000462
$S^2$ (PC)	0,016814	0,001869	0,014601
EV médio	0,2522	0,0225	0,037323
$S^2$ (EV)	0,017887	0,000183	0,000986
ERP	7,34	0,65	1,09

Para efetuar uma avaliação entre as três equações será utilizado os desvios entre os pontos objetos levantados e os transformados pela aplicação das três equações. Assim, podemos elaborar as seguintes hipóteses :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5\%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	0,1641	11	0,014914761	4,000071275
Entre Colunas	0,4738	2	0,236884866	63,53144863
Residual (Dent.)	0,0820	22	0,003728624	
Total	0,7199	35		

O nosso interesse particular é analisar as colunas. Como  $F_{\text{coluna}} = 63,531449 > F_{(2,22)} = 3,44$ , rejeita-se  $H_0$ , ou seja existe uma diferença significativa entre as equações aplicadas para esta fotografia.

Aplicando o teste de Scheffé para as colunas tem-se :

Equações	$ \bar{X}_{\cdot i} - \bar{X}_{\cdot j} $	$\Delta\alpha$	Conclusão
Afim e Projetiva	0,2555	0,06538722	Diferem
Afim e DLT	0,2291	0,06538722	Diferem
Projetiva e DLT	0,0264	0,06538722	Não diferem

### c) Comparação entre os dois procedimentos

Para avaliar o ajuste entre os métodos utilizados em a e b, optou-se por escolher uma das equações e aplicar sobre ela os testes estatísticos. Para tal, escolheu-se a equação projetiva, e a análise será feita avaliando o desvio médio (primeiro caso) e o EV médio (segundo caso) dos tópicos a e b.

Como as variâncias populacionais são desconhecidas e admitidas iguais, independentes e normais tem-se :

1º caso :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para  $\alpha = 5\%$  e  $v = 22$

$$t_{\text{calc}} = 0,4808878$$

Como  $-2.0739 < t_{\text{cal}} < 2.0739$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

2º caso :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para  $\alpha = 5 \%$  e  $v = 18$

$$t_{\text{calc}} = 0,1659201$$

Como  $-2.1009 < t_{\text{cal}} < 2.1009$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

Assim, a escolha entre um procedimento ou outro não traz perdas significativas.

#### d) Conclusão

Tendo avaliado os testes pode-se concluir :

- A equação afim diferiu das outras duas tanto em a como em b;
- A equação da DLT e da projetiva se apresentaram semelhantes em a e diferiram em b;
- A análise do EMQ (PC) e do EV médio apresenta a equação projetiva como a melhor opção tanto em a como em b;
- A avaliação do teste c mostra que não existe diferença significativa entre o procedimento adotado e o método da fixação de pontos.

#### 4.3.4 Avaliação da foto 4

##### a) Utilização da metodologia

Aplicando a metodologia para a foto 4 tem-se os seguinte resultado :

TABELA 19 : Resultados obtidos para a foto 4 usando a metodologia proposta

Parâmetro	FOTO 4		
	Afim	Projetiva	DLT
Pontos Elim.	3;4;6;8;9;10;12	2;5;7;8;11	1;4;12
NPT	5	7	9
NPC	7	5	3
GL	4	6	6
$\hat{\sigma}_0^2$	10,9159	1,9872	15,2715
EMQ (geral)	0,3638	0,0308	0,1093
EMQ (PT)	0,0622	0,0249	0,0760
EMQ (PC)	0,4752	0,0437	0,2049
$S^2$ (Geral)	0,076323	0,000298	0,007389
$S^2$ (PT)	0,000046	0,000065	0,000725
$S^2$ (PC)	0,076306	0,000162	0,014285
EV médio	0,1969	0,014280	0,0496
$S^2$ (EV)	0,019788	0,000105	0,001648
ERP	5,75	0,42	1,44

Para efetuar uma avaliação entre as três equações será utilizado os desvios entre os pontos objetos levantados e os transformados pela aplicação das três equações. Assim, podemos elaborar as seguintes hipóteses :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5 \%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	0,4274	11	0,038858858	1,721341354
Entre Colunas	0,3354	2	0,167722943	7,429668664
Residual (Dent.)	0,4966	22	0,022574754	
Total	1,2595	35		

O nosso interesse particular é analisar as colunas. Como  $F_{\text{coluna}} = 7,4296687 < F(2,22) = 3,44$ , rejeita-se  $H_0$ , ou seja existe diferença significativa entre as equações aplicadas para esta fotografia.

Aplicando o teste de Scheffé para as colunas tem-se :

Equações	$ \bar{X}_{\bullet i} - \bar{X}_{\bullet j} $	$\Delta\alpha$	Conclusão
Afim e Projetiva	0,2238	0,160890391	Diferem
Afim e DLT	0,1780	0,160890391	Diferem
Projetiva e DLT	0,0458	0,160890391	Não diferem

b) Fixando pontos

TABELA 20 : Resultados obtidos para a foto 4 fixando pontos

Parâmetro	FOTO 4		
	Afim	Projetiva	DLT
Pontos Elim.	2;4;6;8;10	2;4;6;8;10	2;4;6;8;10
NPT	7	7	7
NPC	5	5	5
GL	8	6	2
$\hat{\sigma}_0^2$	142,8427	4,2346	117,3837
EMQ (geral)	0,2831	0,0332	0,1079
EMQ (PT)	0,2175	0,0389	0,2098
EMQ (PC)	0,3931	0,0418	0,1383
$S^2$ (Geral)	0,032720	0,000352	0,005784
$S^2$ (PT)	0,002358	0,000146	0,002235
$S^2$ (PC)	0,068244	0,000640	0,011788
EV médio	0,1794	0,0205	0,0497
$S^2$ (EV)	0,015452	0,000033	0,001163
ERP	5,21	0,59	1,45

Para efetuar uma avaliação entre as três equações será utilizado os desvios entre os pontos objetos levantados e os transformados pela aplicação das três equações. Assim, podemos elaborar as seguintes hipóteses :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5\%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	0,2546	11	0,023149148	2,94820893
Entre Colunas	0,2477	2	0,123829945	15,77062553
Residual (Dent.)	0,1727	22	0,007851936	
Total	0,6750	35		

O nosso interesse particular é analisar as colunas. Como  $F_{\text{coluna}} = 15,770626 > F(2,22) = 3,44$ , rejeita-se  $H_0$ , ou seja existe uma diferença significativa entre as equações aplicadas para esta fotografia.

Aplicando o teste de Scheffé para as colunas tem-se :

Equações	$ \bar{X}_{\cdot i} - \bar{X}_{\cdot j} $	$\Delta\alpha$	Conclusão
Afim e Projetiva	0,1960	0,094887057	Diferem
Afim e DLT	0,1443	0,094887057	Diferem
Projetiva e DLT	0,0517	0,094887057	Não diferem

### c) Comparação entre os dois procedimentos

Para avaliar o ajuste entre os métodos utilizados em a e b, optou-se por escolher uma das equações e aplicar sobre ela os testes estatísticos. Para tal, escolheu-se a equação projetiva, e a análise será feita avaliando o desvio médio (primeiro caso) e o EV médio (segundo caso) dos tópicos a e b. Como as variâncias populacionais são desconhecidas e admitidas iguais, independentes e normais tem-se :

1º caso :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para  $\alpha = 5\%$  e  $\nu = 22$

$$t_{\text{calc}} = 0,794376$$

Como  $-2.0739 < t_{\text{cal}} < 2.0739$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

2º caso :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para  $\alpha = 5\%$  e  $\nu = 18$

$$t_{\text{calc}} = 0,116632$$

Como  $-2.1009 < t_{\text{cal}} < 2.1009$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

Assim, a escolha entre um procedimento ou outro não traz perdas significativas.



## d) Conclusão

Tendo avaliado os testes pode-se concluir :

- A equação afim diferiu das outras duas tanto em a como em b;
- A equação da DLT e da projetiva se apresentaram semelhantes tanto em a como em b;
- A análise do EMQ (PC) e do EV médio apresenta a equação projetiva como a melhor opção tanto em a como em b;
- A avaliação do teste c mostra que não existe diferença significativa entre o procedimento adotado e o método da fixação de pontos.

## 4.3.5 Avaliação da foto 5

## a) Utilização da metodologia

Aplicando a metodologia para a foto 5 tem-se os seguinte resultado :

TABELA 21 : Resultados obtidos para a foto 5 usando a metodologia proposta

Parâmetro	FOTO 5		
	Afim	Projetiva	DLT
Pontos Elim.	1;2;3;4;6;9;11;12	3;6;10;11	1;4
NPT	4	8	10
NPC	8	4	2
GL	2	8	8
$\hat{\sigma}_0^2$	0,8869	1,2804	12,9025
EMQ (geral)	0,6026	0,0332	0,1432
EMQ (PT)	0,0164	0,0188	0,0975
EMQ (PC)	0,7380	0,0544	0,3226
$S^2$ (Geral)	0,197297	0,000493	0,014367
$S^2$ (PT)	0,000032	0,000041	0,001319
$S^2$ (PC)	0,158595	0,000222	0,074426
EV médio	0,1056	0,0282	0,0451
$S^2$ (EV)	0,020010	0,000508	0,000951
ERP	3,13	0,82	1,32

Para efetuar uma avaliação entre as três equações será utilizado os desvios entre os pontos objetos levantados e os transformados pela aplicação das três equações. Assim, podemos elaborar as seguintes hipóteses :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5\%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	0,9569	11	0,086988572	1,389836601
Entre Colunas	1,1246	2	0,562277374	8,983636117
Residual (Dent.)	1,3770	22	0,062589064	
Total	3,4584	35		

O nosso interesse particular é analisar as colunas. Como  $F_{\text{coluna}} = 8,983636117 < F(2,22) = 3,44$ , rejeita-se  $H_0$ , ou seja existe diferença significativa entre as equações aplicadas para esta fotografia.

Aplicando o teste de Scheffé para as colunas tem-se :

Equações	$ \bar{X}_{\cdot i} - \bar{X}_{\cdot j} $	$\Delta\alpha$	Conclusão
Afim e Projetiva	0,4014	0,267896982	Diferem
Afim e DLT	0,3412	0,267896982	Diferem
Projetiva e DLT	0,0602	0,267896982	Não diferem

#### b) Fixando pontos

Para efetuar uma avaliação entre as três equações será utilizado os desvios entre os pontos objetos levantados e os transformados pela aplicação das três equações. Assim, podemos elaborar as seguintes hipóteses :

$$H_0 : \mu_{\text{afim}} = \mu_{\text{projetiva}} = \mu_{\text{DLT}}$$

$H_1$  : pelo menos uma das médias anteriores é diferente das demais

Para  $\alpha = 5\%$  tem-se o seguinte quadro da ANOVA :

Fonte de V.	Soma de Q.	GL	Quadrado M	Estatística F
Entre Linhas	0,2456	11	0,022329656	1,382734997
Entre Colunas	0,7718	2	0,385916855	23,89740129
Residual (Dent.)	0,3553	22	0,016148905	
Total	1,3727	35		

TABELA 22 : Resultados obtidos para a foto 5 fixando pontos

Parâmetro	FOTO 5		
	Afim	Projetiva	DLT
Pontos Elim.	2;4;6;8;10	2;4;6;8;10	2;4;6;8;10
NPT	7	7	7
NPC	5	5	5
GL	8	6	2
$\hat{\sigma}_0^2$	730,6940	5,2612	64,9811
EMQ (geral)	0,4175	0,0449	0,0592
EMQ (PT)	0,4798	0,0422	0,1638
EMQ (PC)	0,4838	0,0615	0,0552
$S^2$ (Geral)	0,052926	0,000562	0,001142
$S^2$ (PT)	0,018399	0,000152	0,001424
$S^2$ (PC)	0,117082	0,000536	0,000995
EV médio	0,2385	0,0337	0,0375
$S^2$ (EV)	0,014653	0,000598	0,000429
ERP	6,79	0,98	1,09

O nosso interesse particular é analisar as colunas. Como  $F_{\text{coluna}} = 23,89740129 > F(2,22) = 3,44$ , rejeita-se  $H_0$ , ou seja existe uma diferença significativa entre as equações aplicadas para esta fotografia.

Aplicando o teste de Scheffé para as colunas tem-se :

Equações	$ \bar{X}_{\cdot i} - \bar{X}_{\cdot j} $	$\Delta\alpha$	Conclusão
Afim e Projetiva	0,3159	0,136078693	Diferem
Afim e DLT	0,3051	0,136078693	Diferem
Projetiva e DLT	0,0108	0,136078693	Não diferem

### c) Comparação entre os dois procedimentos

Para avaliar o ajuste entre os métodos utilizados em a e b, optou-se por escolher uma das equações e aplicar sobre ela os testes estatísticos. Para tal, escolheu-se a equação

projetiva, e a análise será feita avaliando o desvio médio (primeiro caso) e o EV médio (segundo caso) dos tópicos a e b.

Como as variâncias populacionais são desconhecidas e admitidas iguais, independentes e normais tem-se :

1º caso :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para  $\alpha = 5 \%$  e  $v = 22$

$$t_{\text{calc}} = 0,1711466$$

Como  $-2.0739 < t_{\text{cal}} < 2.0739$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

2º caso :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

Para  $\alpha = 5 \%$  e  $v = 18$

$$t_{\text{calc}} = 0,6056717$$

Como  $-2.1009 < t_{\text{cal}} < 2.1009$  não se pode rejeitar  $H_0$  com esse nível de significância.

Assim, a escolha entre um procedimento ou outro não traz perdas significativas.

#### d) Conclusão

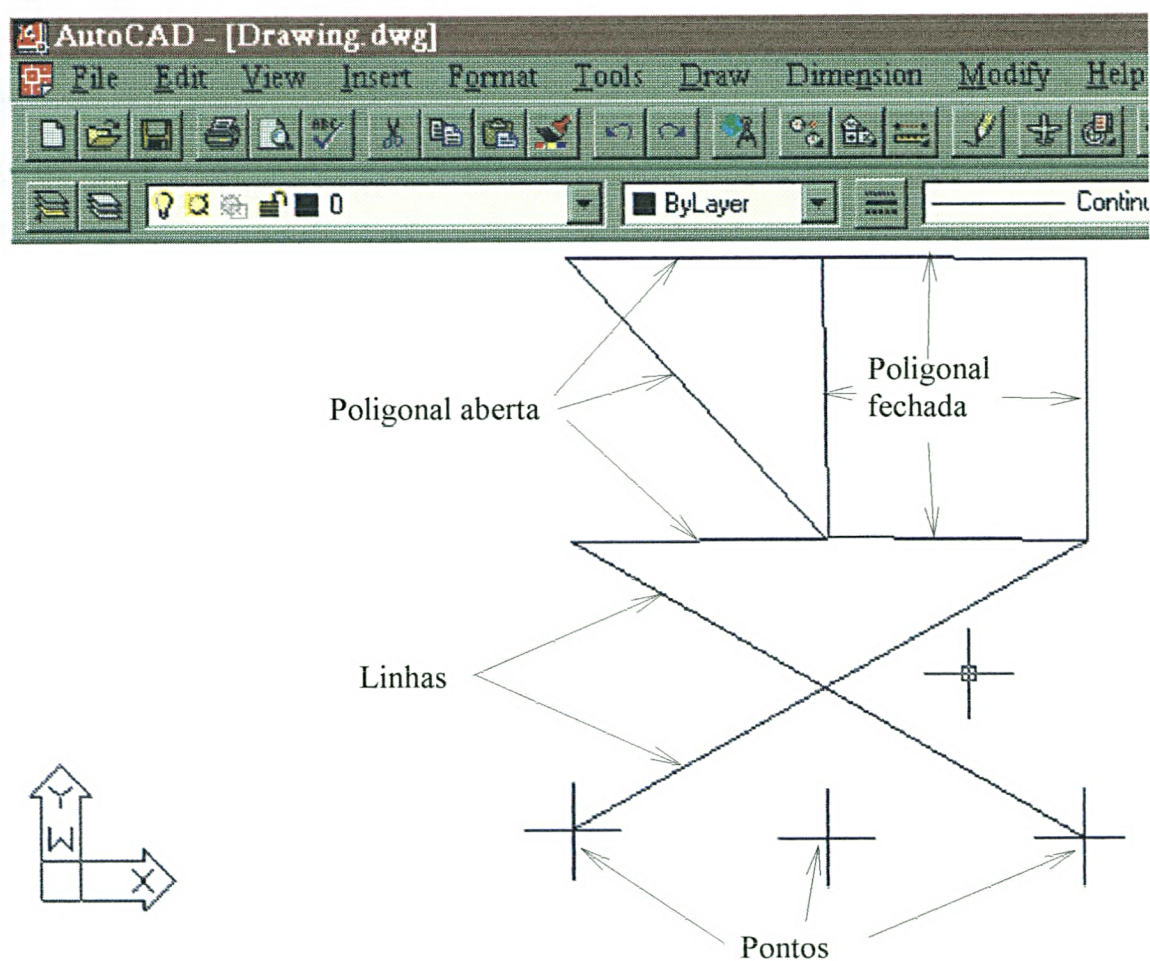
Tendo avaliado os testes pode-se concluir :

- A equação afim diferiu das outras duas tanto em a como em b;
- A equação da DLT e da projetiva se apresentaram semelhantes tanto em a como em b;
- A análise do EMQ (PC) e do EV médio apresenta a equação projetiva como a melhor opção tanto em a como em b;
- A avaliação do teste c mostra que não existe diferença significativa entre o procedimento adotado e o método da fixação de pontos.

#### 4.4 GERAÇÃO DE ARQUIVO DXF DAS FEIÇÕES RETIRADAS

A geração de arquivo DXF das entidades selecionadas segue todo um processo já comentado anteriormente. A precisão das entidades exportadas estão correlacionadas com a equação selecionada e consequentemente com a precisão do ajustamento.

FIGURA 68 : Visualização do arquivo DXF gerado aberto no AutoCAD.14.



Para mostrar a geração de arquivos DXF no SIFAR1.0 seguiu-se os seguintes passos :

- 1 - criou-se um projeto no SIFAR1.0;
- 2 - criou-se um nível de informação chamado TESTE, no qual foram inseridos os elementos extraídos;
- 3 - selecionou-se a equação, a projetiva, e efetuou-se o ajustamento;

- 4 - com o auxílio das ferramentas disponíveis no SIFAR1.0 retirou-se os seguintes elementos : um ponto, uma linha, uma poligonal aberta e uma poligonal fechada;
- 5 - gerou-se o arquivo DXF, o qual se encontra no anexo 11;
- 6 - abriu-se o AutoCAD e importou-se o arquivo DXF gerado;
- 7 - capturou-se a imagem gerada, a qual faz parte deste trabalho ( figura 68) .

#### 4.5 AVALIAÇÃO DA RETIFICAÇÃO

O aplicativo desenvolvido, dentro dos objetivos propostos neste trabalho, deve permitir a retificação digital de imagens. Assim, gerou-se ortoimagens para exemplificar o seu uso dentro do aplicativo.

A retificação de uma imagem tem como objetivo básico transformar uma imagem de projeção central em uma de projeção ortogonal. Para avaliar a funcionalidade desta transformação no SIFAR1.0 estabeleceu-se o seguinte procedimento :

- 1 - gerou-se a ortoimagem;
- 2 - armazenou-se a mesma em formato BMP;
- 3 - dentro do AUTOCAD.14 abriu-se a imagem gerada e com ferramentas do aplicativo, após um devido escalonamento da imagem, mediu-se as distâncias entre os pontos de apoio transformados;
- 4 - analisou-se as distâncias obtidas com as levantadas em campo.

Para o caso da imagem hipotética gerada, espera-se que os pontos transformados determine uma grade regular uma vez que a mesma foi gerada a partir de uma grade regular. Os pontos de apoio transformados deverão estar equidistantes entre si.

Optou-se por utilizar a equação que melhor modelava as distorções presentes na imagem em estudo. Assim, para a imagem hipotética utilizou-se a equação de colinearidade e para as fotografias digitalizadas utilizou-se a equação projetiva.

O escalonamento efetuado no passo 3 foi executado devido a diferença de escala entre o material original (imagem hipotética gerada no MATLAB ou foto digitalizada) e o material gerado na retificação da imagem.

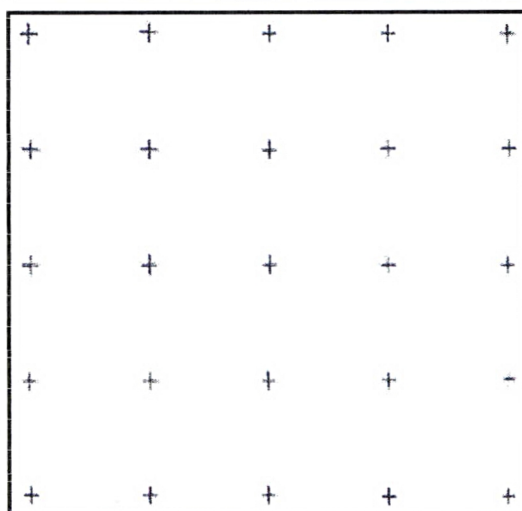
Por exemplo, como foi colocado anteriormente, a grade utilizada na geração da imagem hipotética foi de 50 X 50 m, representada graficamente por 1,5 cm. Assim, quando

gerou-se a ortoimagem foi efetuado um escalonamento médio para que a escala do material retificado fosse próxima do material original.

#### 4.5.1 Avaliação da imagem hipotética

A partir da imagem hipotética gerou-se a seguinte ortoimagem :

FIGURA 69 : Ortoretificação da imagem hipotética



Com o auxílio do AutoCAD obteve-se as medidas entre os pontos de apoio na imagem retificada. A figura 70 mostra a imagem retificada com as distâncias entre os pontos.

Os dados da figura 70 conduzem à tabela 23. Observando a referida tabela pode-se notar os seguintes pontos :

1 - As medidas se apresentam concentradas em torno da média. Essa afirmação tem fundamentação quando se observa o desvio médio e o coeficiente de variação, ambos são baixos. A concentração dos dados em torno da média garante uma pequena variação, que por sua vez indica que os pontos estão próximos de uma equidistância; Pode-se notar também que a amplitude máxima é pequena, cerca de 2,59 % do valor médio, reafirmando o que se disse anteriormente.

2- Adotando-se o valor médio como a distância entre os pontos da grade chega-se a uma escala média para a ortoimagem de 1:3131,48315;

3 - Aplicando-se essa escala média aos desvios chega-se a um valor médio de 35,1411 cm. Partindo do princípio que um usuário possa medir uma distância em planta com uma precisão de 0,5 mm, fazendo uso de um escalímetro normal, chega-se a conclusão que a maior escala possível para gerar a ortoimagem é de 1 : 703.

FIGURA 70 : Medidas entre os pontos obtidas no AutoCAD

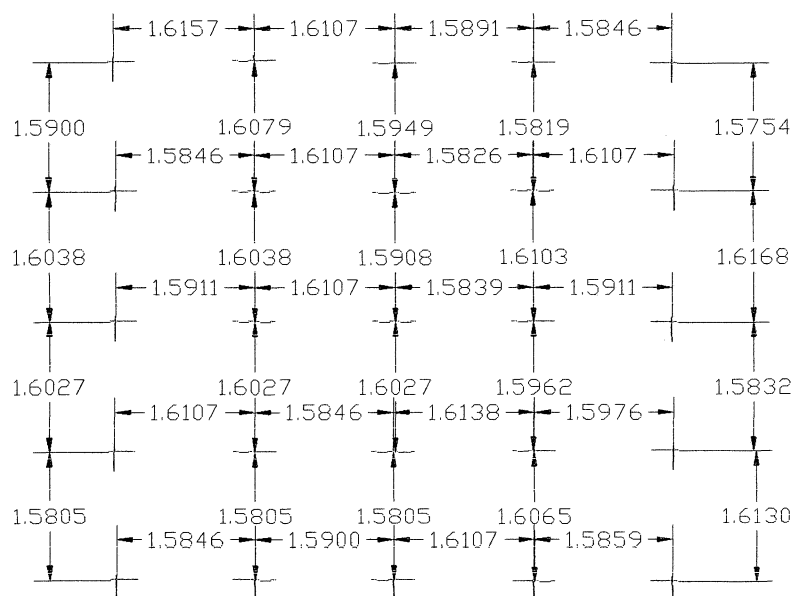




TABELA 23 : Estatística para a imagem retificada

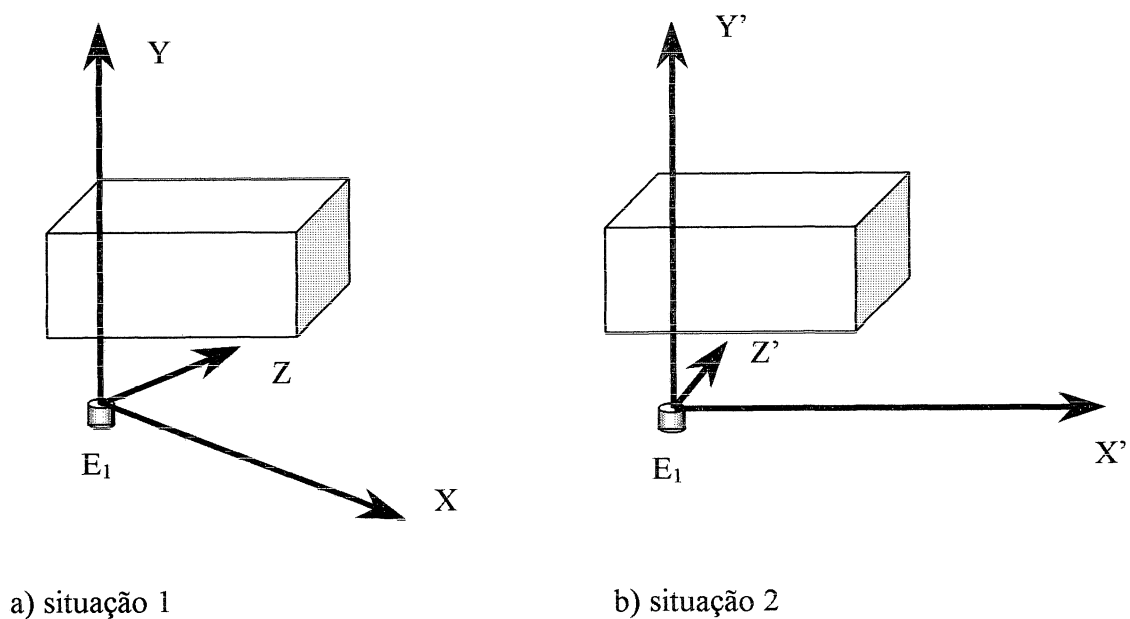
Direção	Distância (cm)	Desvios (D)	D x E (cm)
1;2	1.5846	0.0120875	37.85180258
2;3	1.59	0.0066875	20.94179357
3;4	1.6107	0.0140125	43.87990764
4;5	1.5859	0.0107875	33.78087448
1;6	1.5805	0.0161875	50.69088349
2;7	1.5805	0.0161875	50.69088349
3;8	1.5805	0.0161875	50.69088349
4;9	1.6065	0.0098125	30.72767841
5;10	1.613	0.0163125	51.08231888
6;7	1.6107	0.0140125	43.87990764
7;8	1.5846	0.0120875	37.85180258
8;9	1.6138	0.0171125	53.5875054
9;10	1.5976	0.0009125	2.857478374
6;11	1.6027	0.0060125	18.82804244
7;12	1.6027	0.0060125	18.82804244
8;13	1.6027	0.0060125	18.82804244
9;14	1.5962	0.0004875	1.526598036
10;15	1.5832	0.0134875	42.23587899
11;12	1.5911	0.0055875	17.4971621
12;13	1.6107	0.0140125	43.87990764
13;14	1.5839	0.0127875	40.04384078
14;15	1.5911	0.0055875	17.4971621
11;16	1.6038	0.0071125	22.2726739
12;17	1.6038	0.0071125	22.2726739
13;18	1.5908	0.0058875	18.43660705
14;19	1.6103	0.0136125	42.62731438
15;20	1.6168	0.0201125	62.98195485
16;17	1.5846	0.0120875	37.85180258
17;18	1.6107	0.0140125	43.87990764
18;19	1.5826	0.0140875	44.11476888
19;20	1.6107	0.0140125	43.87990764
16;21	1.59	0.0066875	20.94179357
17;22	1.6079	0.0112125	35.11175482
18;23	1.5949	0.0017875	5.597526131
19;24	1.5819	0.0147875	46.30680708
20;25	1.5754	0.0212875	66.66144756
21;22	1.6157	0.0190125	59.53732339
22;23	1.6107	0.0140125	43.87990764
23;24	1.5891	0.0075875	23.7601284
24;25	1.5846	0.0120875	37.85180258
Média	1.5966875	0.011221875	35.14111247
Esc. Média (E)	3131.483149		
Desvio Padrão	0.012476608 cm		
Curtose	-1.494687027	Curva Leptocúrtica	
C. de variação	0.781405729 %		
Amplitude	0.0414 cm		
Desvio Médio	0.011221875 cm		

#### 4.5.2 Avaliação da foto 5

Durante os primeiros testes de retificação da foto 5 percebeu-se que na direção Y havia um fator de escala que aumentava as distâncias em aproximadamente 20 cm. A explicação para tal fato, se deve ao levantamento dos pontos de apoio. Neste levantamento, se preocupou em colocar o eixo X paralelo à fachada fotografada, de tal sorte que os valores da cota Z para os pontos da superfície fotografada fossem próximos. Esta configuração dos eixos é necessária para que a modelagem da equação projetiva, para gerar uma ortoimagem, possa ser eficiente, uma vez que a transformação projetiva implementada é no plano e não no espaço.

Para mostrar o problema detectado anteriormente, realizou-se dois testes. No primeiro o sistema do espaço objeto ficou como foi arbitrado no levantamento (situação 1), e no segundo o sistema sofreu uma rotação em torno do eixo Y até que os pontos da fachada se encontrassem o mais próximo possível do paralelismo com o eixo Z (situação 2). Para melhor entendimento das duas situações, ver figura abaixo.

FIGURA 71 :Posição dos eixos em cada situação.



Efetuiu-se a retificação dos dois testes e abriu-se as imagens geradas no AutoCAD. Após escalonar devidamente as imagens mediu-se as distâncias entre os pontos de apoio retificados. As figuras seguintes mostram os pontos e as medidas obtidas via AutoCAD. Na figura 72 tem-se a situação 1, sistema original, e na figura 73 tem-se a situação 2, o sistema rotacionado. Os parâmetros para rotacionar o sistema foram obtidos via MATLAB, através de uma regressão linear dos pares ordenados (x,z) dos pontos de apoio.

O escalonamento da imagem se deve ao mesmo fato explicado anteriormente.

Pode-se notar que as distâncias entre os pontos 5-6; 6-10; 7-11; 8-12, nas duas situações diferem entre si por um valor próximo a 20 cm. As distâncias reais para esses respectivos pontos são : 3.735, 3.60, 3.58 e 3.60 m. O desvio médio, em relação ao real, nas duas situações são 23.88 e 6.03 cm respectivamente. Percebe-se então que a rotação do sistema permitiu uma melhora significativa dos resultados.

FIGURA 72 : Medidas entre os pontos obtidas no AutoCAD para situação 1.

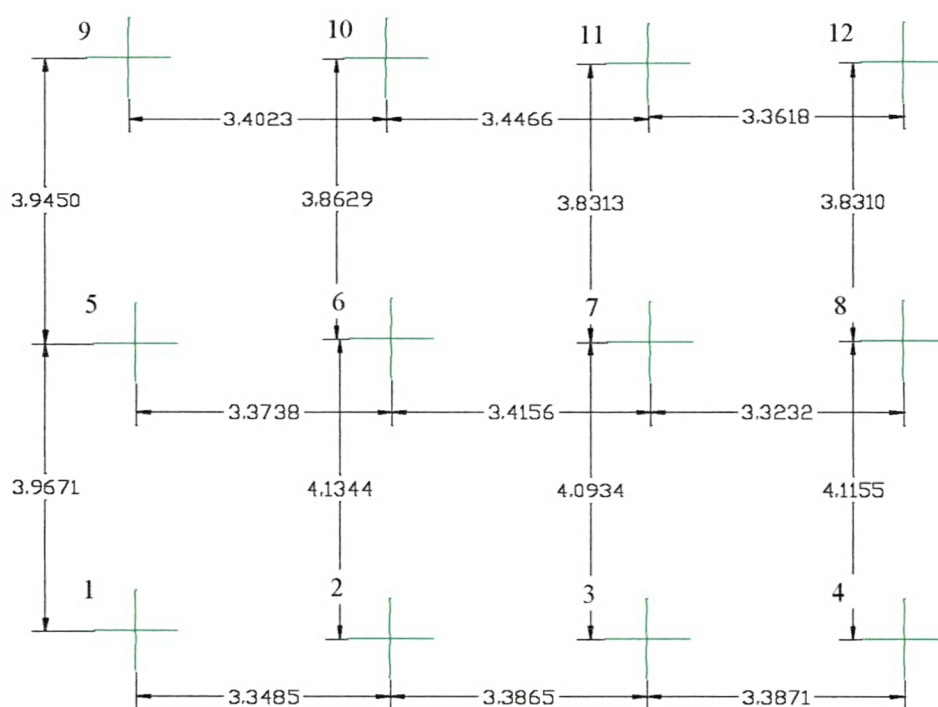
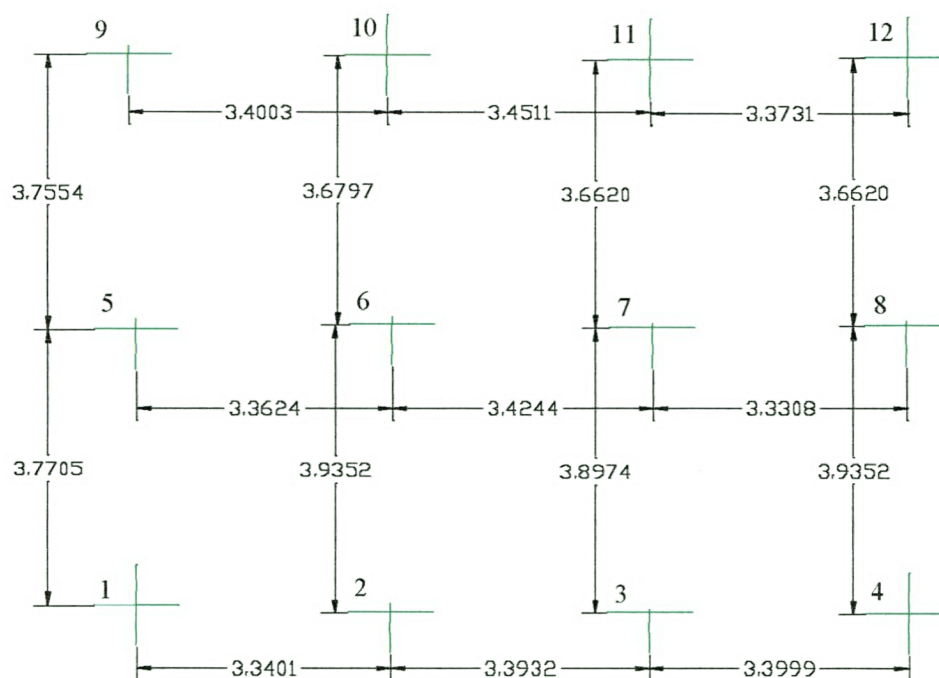


FIGURA 73 : Medidas entre os pontos obtidas no AutoCAD para situação 2.



Adotando o procedimento utilizado na situação 2 gerou-se a ortoimagem da foto 5.

FIGURA 74 : Imagem original





FIGURA 75 Imagem retificada após rotação do sistema



A figura 73 possui os dados necessários para analisar a retificação da foto 5. O desvio médio entre as distâncias medidas em campo e as obtidas sobre a ortoimagem é de 5,362 cm, como mostra a tabela abaixo.

TABELA 24: Análise da ortoimagem

Direção	Distância (m)		Desvios (D) (m)
	Campo	Ortoimagem	
5;6	3.36	3.3624	0.0024
6;7	3.31	3.4244	0.1144
7;8	3.29	3.3308	0.0408
5;9	3.735	3.7554	0.0204
6;10	3.6	3.6797	0.0797
7;11	3.58	3.662	0.082
8;12	3.6	3.662	0.062
9;10	3.4	3.4003	0.0003
10;11	3.375	3.4511	0.0761
11;12	3.315	3.3731	0.0581
Média	3.4565	3.51012	0.05362

## 5.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O SIFAR1.0 surge como uma proposta para encurtar a distância entre os profissionais da arquitetura e a fotogrametria não convencional. O aplicativo tem como princípio básico servir como ferramenta no levantamento de dados de sítios históricos com o objetivo de documentação. Os testes efetuados neste trabalho tiveram como objetivo mostrar a funcionalidade deste aplicativo para gerar plantas e ortoimagens, documentos, muitas vezes, necessários no processo de documentação.

O aplicativo não fica restrito apenas a fotografias de fachadas. A utilização de imagens aéreas não convencionais é permitida. A aplicabilidade do SIFAR1.0 sobre tais fotografias, permite a usuários como geólogos, agrônomos, etc, obter informações de grandezas como áreas e distâncias, dentro de uma incerteza adequada para suas finalidades, com uma maior rapidez e flexibilidade.

Os procedimentos implementados para efetuar tanto a monorestituição como a retificação, fazendo-se uso das equações projetiva, afim, DLT e colinearidade parametrizada, dão uma maior flexibilidade ao usuário no momento de retirar as feições e/ou gerar ortoimagens.

A exportação das feições vetorizadas em arquivos DXF permitem ao usuário fazer uso do potencial do AutoCAD para tratar, manipular, apresentar e exportar entidades gráficas.

### 5.2 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos com os testes realizados, concluiu-se que :

- a) O aplicativo proposto atingiu seus objetivos básicos, ou seja : executa retificação, de imagem, extrai feições e as exporta para o AutoCAD em forma de arquivos DXF.
- b) O tratamento digital de uma imagem pode ser efetuado no SIFAR1.0.

c) O aplicativo possui quatro equações implementadas para ligar o espaço objeto com o espaço imagem, o que permite uma maior flexibilidade ao usuário no momento de optar por uma delas. O aplicativo permite gerar relatórios que auxiliam o usuário no momento de optar por uma equação ou por outra.

d) O aplicativo se mostrou útil para trabalhar com imagens aéreas. Na imagem hipotética criada obteve-se um erro médio quadrático nos pontos de checagem de 41,49 cm fazendo-se uso da equação de colinearidade. A maior escala possível de se utilizar com esse valor médio é de 1 : 900. A ortoimagem gerada apresentou um desvio médio nas distâncias entre os pontos da grade de 1,12 mm, correspondendo a 35,14 cm na escala média da ortoimagem. Essa variação permite gerar, no máximo, uma ortoimagem na escala de 1 : 703. A diferença nas escalas máximas permitidas se deve ao fato de que na primeira analisou-se o EMQ (PC) e na última analisou-se o desvio médio.

e) O SIFAR1.0 mostrou-se apropriado para trabalhar com fotos de fachadas. Para as fotos utilizadas neste trabalho o erro médio quadrático permitiu chegar a uma escala de até 1:50, a qual é utilizada em muitos levantamentos para documentação de sítios históricos. A escala média das fotografias utilizadas é cerca de 1 : 100; A utilização de fotos inclinadas é permitida, o que flexibiliza a cobertura do objeto.

f) A ortoimagem da foto 5, a qual apresenta uma inclinação bastante acentuada, permitiu gerar um produto final na escala de 1 : 100, uma vez que o desvio médio entre as distâncias de campo e as calculadas foi de 5,36 cm.

g) É possível a exportação das feições retiradas pelo SIFAR1.0. Os arquivos DXF gerados foram lidos sem nenhum problema pelo AutoCAD.14. As limitações presentes na geração destes arquivos não foram consideradas um problema em si, uma vez que as alterações das propriedades de um objeto como espessura de traço, cor do nível de inserção, preenchimento e tipo de traço, são operações fáceis de serem executadas no AutoCAD.

h) A posição do sistema de referência em relação ao sistema fotogramétrico devem ser consonantes.

i). Notou-se que o plano fotografado tem que estar o mais paralelo possível do plano XY do sistema de referência adotado, pois esse fator influencia a geração de ortoimagem quando se trabalha com a equação projetiva.

j) A ausência de um rotina para calcular a matriz variância-covariância dos pontos de apoio ajustados não permitiu que fosse feita uma melhor ponderação na eliminação de pontos

no ajustamento. Assim, foi adotado um procedimento para eliminação sucessiva de pontos de apoio até se obter um sigma a posteriori o mais próximo possível de 1. Esse procedimento possui falhas, como foi mostrado. Entretanto, a variação dos parâmetros classificadores, EMQ e ERP, nas diferentes situações são valores pequenos, possíveis de serem negligenciados.

l) Ainda que exista a falta do módulo de impressão, isso não comprometeu o objetivo de geração de ortoimagens pelo SIFAR1.0, uma vez que as imagens geradas puderam ser armazenadas em formato BMP e posteriormente manipuladas por outros softwares gráficos.

m) A limitação do tamanho do arquivo de imagem a 8 Mb é um problema presente nesta versão do aplicativo. Ainda que para as fotos estudadas neste trabalho, 10 x 15 cm, tal capacidade permita obter uma imagem com resolução superior ao mínimo recomendado, ou seja, 50  $\mu$ m, essa capacidade torna-se um problema para fotos aéreas, 23 x 23 cm.

### 5.3 RECOMENDAÇÕES

O aplicativo analisado não está completo, é necessário estudar e implementar diversas rotinas para torná-lo mais eficaz. Para tanto recomenda-se a título de sugestões :

- a) O módulo de impressão de imagens não pôde ser terminado. É importante que esse módulo seja implementado e permita a geração das grades , inserção de títulos, legendas, etc;
- b) Desenvolver ferramentas para deletar, copiar e colar entidades , pois a presença destas dinamiza o processo de retirada de feição;
- c) Utilizar o método combinado com injunções para avaliar se o mesmo melhora os resultados;
- d) Ampliar o tamanho do arquivo de imagem a ser manipulado;
- e) O modo de zoom implementado no SIFAR1.0 permite somente retirar feições ou coletar os pontos de controle com a precisão de um pixel. É necessário implementar um outro procedimento para poder efetuar essa operação com uma precisão maior.
- f) O tratamento por planos de fachada, presentes em alguns softwares, não se encontra nesta versão. Sugere-se que seja alterada a estrutura do SIFAR1.0 para permitir tratar objetos em planos distintos;



g) O reconhecimento automático de pontos de apoio é um processo que dinamiza a coleta de pontos, assim seria extremamente importante estudar e implementar esse item no aplicativo;

h) Aumentar a capacidade de armazenamento de pontos de apoio e checagem;

i) Como o aplicativo se destina a documentação arquitetônica de sítios históricos, pode-se pensar numa estrutura que permita manipular um banco de dados de imagens do objeto em estudo. Essa estrutura poderia também associar as entidades vetorizadas, sobre as imagens, a um banco de dados, onde informações textuais dos objetos vetorizados pudessem ser consultados;

j) Implementar o ajuste simultâneo de imagens para verificar se o mesmo melhora a precisão dos objetos vetorizados;

l) Inserir algoritmos para detecção de erros grosseiros;

m) permitir o uso de câmaras digitais com autocalibração; e

n) implementar algoritmos para usar feições não pontuais como apoio de campo.

**ANEXOS 1 - Arquivo tipo AUX**

Tese

UFV

Fragassi

01/03/98

200

0 0 0

80 100 120

0

0 0 50 0 0

25 1

1 1 20 28 1 1 -100.0290 -100.0294 1 1 50 50 50 1 1 1

0 1 88 23 1 1 -52.6422 -105.2848 1 1 100 50 53 1 1 1

1 1 163 27 1 1 -0.0001 -101.7107 1 1 150 50 51 1 1 1

0 1 242 18 1 1 54.5570 -109.1149 1 1 200 50 55 1 1 1

1 1 329 11 1 1 115.4288 -115.4296 1 1 250 50 58 1 1 1

0 1 17 84 1 1 -101.7139 -50.8572 1 1 50 100 51 1 1 1

1 1 92 85 1 1 -50.0037 -50.0039 1 1 100 100 50 1 1 1

0 1 163 85 1 1 -0.0001 -50.0021 1 1 150 100 50 1 1 1

1 1 242 80 1 1 54.5501 -54.5504 1 1 200 100 55 1 1 1

0 1 336 74 1 1 120.0311 -60.0159 1 1 250 100 60 1 1 1

1 1 33 142 1 1 -90.9199 0 1 1 50 150 44 1 1 1

0 1 97 142 1 1 -46.1553 0 1 1 100 150 45 1 1 1

1 1 164 142 1 1 0 0 1 1 150 150 48 1 1 1

0 1 235 142 1 1 50.0018 0 1 1 200 150 50 1 1 1

1 1 320 142 1 1 109.1096 0 1 1 250 150 55 1 1 1

0 1 37 192 1 1 -88.2476 44.1241 1 1 50 200 42 1 1 1

1 1 100 192 1 1 -44.1201 44.1204 1 1 100 200 42 1 1 1

0 1 164 194 1 1 0.0001 46.1555 1 1 150 200 45 1 1 1

1 1 235 199 1 1 50.0037 50.0039 1 1 200 200 50 1 1 1

0 1 310 200 1 1 101.7139 50.8572 1 1 250 200 51 1 1 1

1 1 40 239 1 1 -85.7323 85.7329 1 1 50 250 40 1 1 1

0 1 99 244 1 1 -44.7825 89.5657 1 1 100 250 43 1 1 1

1 1 164 255 1 1 0.0001 100.0150 1 1 150 250 50 1 1 1

0 1 239 261 1 1 52.6422 105.2848 1 1 200 250 53 1 1 1

1 1 307 255 1 1 100.0290 100.0294 1 1 250 250 50 1 1 1

0

**ANEXOS 2 - Arquivo tipo PRJ**

Tese

d:\testes\foto.bmp

UFV

Fragassi

01/03/98

200

25

```

1 1 20 28 1.000 1.000 -100.0290 -100.0294 1.000 1.000 50.0000 50.0000 50.0000 1.000 1.000 1.000
0 1 88 23 1.000 1.000 -52.6422 -105.2848 1.000 1.000 100.0000 50.0000 53.0000 1.000 1.000 1.000
1 1 163 27 1.000 1.000 -0.0001 -101.7107 1.000 1.000 150.0000 50.0000 51.0000 1.000 1.000 1.000
0 1 242 18 1.000 1.000 54.5570 -109.1149 1.000 1.000 200.0000 50.0000 55.0000 1.000 1.000 1.000
1 1 329 11 1.000 1.000 115.4288 -115.4296 1.000 1.000 250.0000 50.0000 58.0000 1.000 1.000 1.000
0 1 17 84 1.000 1.000 -101.7139 -50.8572 1.000 1.000 50.0000 100.0000 51.0000 1.000 1.000 1.000
1 1 92 85 1.000 1.000 -50.0037 -50.0039 1.000 1.000 100.0000 100.0000 50.0000 1.000 1.000 1.000
0 1 163 85 1.000 1.000 -0.0001 -50.0021 1.000 1.000 150.0000 100.0000 50.0000 1.000 1.000 1.000
1 1 242 80 1.000 1.000 54.5501 -54.5504 1.000 1.000 200.0000 100.0000 55.0000 1.000 1.000 1.000
0 1 336 74 1.000 1.000 120.0311 -60.0159 1.000 1.000 250.0000 100.0000 60.0000 1.000 1.000 1.000
1 1 33 142 1.000 1.000 -90.9199 0.0000 1.000 1.000 50.0000 150.0000 44.0000 1.000 1.000 1.000
0 1 97 142 1.000 1.000 -46.1553 0.0000 1.000 1.000 100.0000 150.0000 45.0000 1.000 1.000 1.000
1 1 164 142 1.000 1.000 0.0000 0.0000 1.000 1.000 150.0000 150.0000 48.0000 1.000 1.000 1.000
0 1 235 142 1.000 1.000 50.0018 0.0000 1.000 1.000 200.0000 150.0000 50.0000 1.000 1.000 1.000
1 1 320 142 1.000 1.000 109.1096 0.0000 1.000 1.000 250.0000 150.0000 55.0000 1.000 1.000 1.000
0 1 37 192 1.000 1.000 -88.2476 44.1241 1.000 1.000 50.0000 200.0000 42.0000 1.000 1.000 1.000
1 1 100 192 1.000 1.000 -44.1201 44.1204 1.000 1.000 100.0000 200.0000 42.0000 1.000 1.000 1.000
0 1 164 194 1.000 1.000 0.0001 46.1555 1.000 1.000 150.0000 200.0000 45.0000 1.000 1.000 1.000
1 1 235 199 1.000 1.000 50.0037 50.0039 1.000 1.000 200.0000 200.0000 50.0000 1.000 1.000 1.000
0 1 310 200 1.000 1.000 101.7139 50.8572 1.000 1.000 250.0000 200.0000 51.0000 1.000 1.000 1.000
1 1 40 239 1.000 1.000 -85.7323 85.7329 1.000 1.000 50.0000 250.0000 40.0000 1.000 1.000 1.000
0 1 99 244 1.000 1.000 -44.7825 89.5657 1.000 1.000 100.0000 250.0000 43.0000 1.000 1.000 1.000
1 1 164 255 1.000 1.000 0.0001 100.0150 1.000 1.000 150.0000 250.0000 50.0000 1.000 1.000 1.000
0 1 239 261 1.000 1.000 52.6422 105.2848 1.000 1.000 200.0000 250.0000 53.0000 1.000 1.000 1.000
1 1 307 255 1.000 1.000 100.0290 100.0294 1.000 1.000 250.0000 250.0000 50.0000 1.000 1.000 1.000

```

1 2

150.000403577773

149.999611839035

110.000208112936

0.000000263406

0.000000194184

0.000000242558

-60.000245847291

0.000392322229

-0.000361602810

0.000000014392

0.000000837197

0.000005540731

```

0.696278862223
-0.000294293916
-113.787979224034
-0.000257240531
0.881998600212
-125.128299657765
0.000000001431
0.000000141314
-0.000000002537 0.000000158615
0.000000015084 -0.000000038902 0.000000068751
0.000000000001 -0.000000000129 0.000000000027 0.000000000000
0.0000000000015 -0.000000000022 0.000000000050 0.000000000000 0.000000000000
0.0000000000008 -0.000000000028 0.000000000044 0.000000000000 0.000000000000 0.000000000000
-0.000000023094 0.000000038089 -0.000000068911 -0.000000000027 -0.000000000051 -0.000000000044
0.000000069821
0.000000139215 -0.000000001945 0.000000012586 0.000000000001 0.000000000012 0.000000000006 -
0.000000020465 0.000000137516
-0.000000002255 0.000000155163 -0.000000035663 -0.000000000126 -0.000000000020 -0.000000000025
0.000000034836 -0.000000001774 0.000000152175
-0.000000000000 -0.000000000000 0.000000000000 0.000000000000 -0.000000000000 -0.000000000000
0.000000000000 -0.000000000000 -0.000000000000 0.000000000000
-0.000000000084 0.000000000127 -0.000000000031 -0.000000000000 -0.000000000000 -0.000000000000
0.000000000035 -0.000000000083 0.000000000125 -0.000000000000 0.000000000000
-0.000000000114 -0.000000000093 0.000000000015 0.000000000000 0.000000000000 0.000000000000 -
0.000000000006 -0.000000000113 -0.000000000091 0.000000000000 -0.000000000000 0.000000000000
NIVEIS
3
0 0 0 0 Projeto
1 0 0 0 Portas
2 0 0 0 Janelas
3 0 0 0 Vidros
ENDCAB

```

**ANEXOS 3 - Imagens Utilizadas**

Foto 1



Foto 2





Foto 3



Foto 4





Foto 5



**ANEXOS 4 - Coordenadas dos pontos de apoio**

PONTO S	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	500.2239	101.2978	475.6903
2	503.4291	101.1893	474.6929
3	506.6179	101.2060	473.7011
4	509.7894	101.1903	472.7875
5	500.2440	105.0156	475.7531
6	503.4624	105.0815	474.6599
7	506.6225	105.0490	473.6746
8	509.7680	105.0854	472.6959
9	500.1399	108.7644	475.6713
10	503.3671	108.6804	474.6691
11	506.5420	108.6383	473.5882
12	509.7713	108.6735	472.6830



## ANEXOS 5 – Dados para avaliação da imagem hipotética

Procedimento				
Pontos	Desvios (m)			
	Afim	projetiva	DLT	Colinearidade
1	0,9442	0,6659	0,3334	0,7785
2	4,3556	0,8716	0,5174	0,8904
3	0,6067	5,2753	0,4338	0,3824
4	9,1576	2,3634	0,5050	0,4165
5	21,0950	0,5506	0,7937	0,7828
6	1,1098	6,6690	0,3905	0,8882
7	0,4453	0,4871	0,2109	0,5266
8	0,5465	0,6093	0,9154	1,3713
9	6,0018	1,3547	0,3911	0,1982
10	22,3568	8,3088	0,9019	0,1992
11	9,1969	0,9822	0,3386	0,2742
12	3,9176	1,0783	0,3091	0,3858
13	0,5372	0,1880	0,3568	0,1967
14	0,4311	1,8086	0,2672	0,1983
15	8,9352	1,8059	0,0618	0,2563
16	13,5982	0,6431	0,3063	0,2478
17	8,7322	2,9721	0,3264	0,1986
18	3,6390	1,7876	0,2511	0,2892
19	0,5181	0,6116	0,3714	0,4258
20	2,6742	1,0461	0,5061	0,4546
21	20,2631	0,8194	0,2118	0,4454
22	11,2437	2,5149	0,4697	0,9904
23	0,4248	8,9856	0,6163	0,2891
24	5,3558	10,8401	0,9549	0,5517
25	0,2333	0,6421	0,6823	0,6086

<b>Pontos fixos</b>				
Pontos	Desvios (m)			
	Afim	projetiva	DLT	Colinearidade
1	5,6974	1,9077	0,1450	0,3960
2	6,8659	2,3376	0,4377	0,4884
3	5,2032	4,2005	0,2779	0,6283
4	5,2971	1,4388	0,1632	0,3083
5	16,0550	0,1857	0,3244	0,1351
6	6,0513	7,6054	0,4811	0,3440
7	5,2528	1,0600	0,4400	0,3682
8	5,2825	0,3759	1,3078	1,2822
9	1,0487	1,6618	0,0908	0,1594
10	17,1026	8,1516	0,4045	0,1332
11	5,4542	0,8439	0,2525	0,4114
12	3,2402	1,2108	0,2385	0,3504
13	5,2834	0,4407	0,2428	0,1341
14	5,6810	2,1351	0,0700	0,2763
15	5,4523	1,3721	0,0415	0,2086
16	8,0952	1,3438	0,3682	0,2735
17	3,5200	3,7288	0,3167	0,2974
18	4,2765	2,5067	0,3416	0,2667
19	5,7976	0,8198	0,4545	0,4105
20	4,7710	2,6633	0,9404	0,7212
21	14,8070	1,1665	0,3375	0,4572
22	6,9865	1,3495	0,8540	0,7966
23	5,0512	7,1249	0,0710	0,2893
24	7,8484	8,5386	0,3910	0,5210
25	5,3690	2,1234	0,0862	0,1336

Procedimento				
Direções	EV (m)			
	Afim	projetiva	DLT	Colinearidade
1-2	2,0590	0,0740	0,6490	0,0550
2-3	1,9670	0,7160	0,5210	0,9740
3-4	5,3140	0,4150	0,6150	0,2700
4-5	11,1280	0,5200	0,3670	0,4930
6-7	1,2800	5,7250	0,1380	0,6440
7-8	0,5090	0,0250	0,3730	0,4920
8-9	4,9260	1,4260	0,5780	0,5370
9-10	15,6900	6,3350	0,5540	0,0450
11-12	5,2870	0,2160	0,0650	0,1110
12-13	3,4920	1,2330	0,4390	0,5720
13-14	0,5150	1,6000	0,4790	0,3680
14-15	8,9800	3,4950	0,2000	0,0320
16-17	5,8810	1,3110	0,0220	0,0920
17-18	5,8160	2,1370	0,0230	0,1900
18-19	0,3510	0,3210	0,4710	0,2440
19-20	2,4720	0,4060	0,7220	0,5810
21-22	9,2880	1,2820	0,4570	0,4720
22-23	3,6520	1,6180	0,6200	0,8810
23-24	2,6800	5,5340	0,1520	0,0340
24-25	2,6530	3,1530	0,5120	0,7010
1-6	1,5300	2,8860	0,3670	0,8240
6-11	1,8360	3,6420	0,5380	0,3660
11-16	6,2760	1,0770	0,4850	0,2340
16-21	7,9640	0,5390	0,4060	0,6750
2-7	4,1520	0,5220	0,5620	1,0610
7-12	0,1950	0,5330	0,4320	0,4790
12-17	6,3250	2,7580	0,5000	0,1430
17-22	3,9520	3,9840	0,5540	0,9600
3-8	0,0710	4,8050	1,2700	1,5820
8-13	0,8810	0,4690	1,0940	1,2740
13-18	3,9610	1,6910	0,0640	0,3350
18-23	3,2830	10,5630	0,6950	0,2510
4-9	4,1090	3,1670	0,0570	0,4800
9-14	4,3010	0,7030	0,0280	0,0160
14-19	0,0710	0,8260	0,0690	0,4740
19-24	4,1790	9,4670	1,1990	0,8800
5-10	5,0950	3,8760	0,1320	0,7290
10-15	10,7060	3,6180	0,2700	0,0010
15-20	1,2870	0,1670	0,1670	0,3290
20-25	1,4860	1,2530	0,7750	0,5860

Pontos fixos				
Direções	EV (m)			
	Afim	projetiva	DLT	Colinearidade
1-2	2,0230	0,7320	0,2570	0,4070
2-3	2,0120	1,1890	0,4930	0,6370
3-4	5,3590	0,2610	0,4310	0,4120
4-5	11,1860	0,4520	0,1350	0,0700
6-7	1,3260	6,2440	0,3230	0,3160
7-8	0,4630	0,2030	0,3100	0,4020
8-9	4,9750	1,3530	0,4370	0,4430
9-10	15,7690	5,9910	0,2270	0,2100
11-12	5,2430	0,3760	0,0110	0,0610
12-13	3,4490	1,3100	0,4790	0,4830
13-14	0,4650	1,9000	0,3110	0,4100
14-15	9,0350	2,9070	0,0890	0,0680
16-17	5,8400	1,2210	0,0890	0,1030
17-18	5,7600	2,4370	0,0980	0,1070
18-19	0,3060	0,2450	0,4240	0,4150
19-20	2,5220	1,1820	1,0140	0,8620
21-22	9,2330	1,5920	0,4620	0,3440
22-23	3,5970	1,0080	0,5350	0,6860
23-24	2,7320	4,5820	0,0110	0,0600
24-25	2,6190	4,0500	0,0930	0,1770
1-6	1,4060	2,1300	0,5130	0,4280
6-11	1,9730	4,1320	0,3290	0,3120
11-16	6,1640	1,2080	0,3140	0,2940
16-21	7,8420	0,0890	0,6890	0,7250
2-7	4,2910	1,2800	0,8160	0,8290
7-12	0,3300	0,7880	0,4180	0,3570
12-17	6,1990	2,9850	0,2470	0,2890
17-22	3,8300	3,1900	0,9370	0,9600
3-8	0,2040	4,2720	1,3000	1,3420
8-13	1,0170	0,3510	1,2460	1,1720
13-18	3,8440	2,0400	0,2370	0,1560
18-23	3,4140	9,4960	0,2870	0,2590
4-9	4,2510	2,7110	0,0730	0,1300
9-14	4,4360	0,7170	0,0190	0,1150
14-19	0,2020	0,3210	0,4350	0,3580
19-24	4,3190	8,2120	0,8130	0,8280
5-10	5,2460	3,5820	0,1150	0,1510
10-15	10,8750	3,5440	0,2190	0,0790
15-20	1,4200	0,7410	0,4440	0,3170
20-25	1,3600	0,1260	0,3570	0,4250

## ANEXOS 6 – Dados para avaliação da foto 1

<b>Procedimento</b>			
Pontos	Desvios (m)		
	Afim	Projetiva	Dlt
1	0,2066	0,0050	0,0516
2	0,0305	0,0460	0,0135
3	0,0936	0,0083	0,0304
4	0,1974	0,1510	0,7458
5	0,1012	0,0167	0,0566
6	0,0498	0,0175	0,0273
7	0,0212	0,0103	0,0028
8	0,0110	0,1286	0,1178
9	0,0139	0,0227	0,0642
10	0,0428	0,0148	0,0395
11	0,1056	0,0952	0,0285
12	0,1888	0,1877	0,1340

<b>Pontos Fixos</b>			
Pontos	Desvios (m)		
	Afim	Projetiva	Dlt
1	0,1626	0,0072	0,0715
2	0,0343	0,0394	0,0272
3	0,1097	0,0163	0,0200
4	0,1985	0,1546	0,3019
5	0,0824	0,0394	0,0471
6	0,0934	0,0347	0,0409
7	0,0841	0,0309	0,0047
8	0,0708	0,0600	0,0879
9	0,0664	0,0269	0,0904
10	0,0780	0,0297	0,0431
11	0,0698	0,0263	0,0228
12	0,1274	0,0357	0,0890

Comparação entre Procedimento e Pto Fixos			
Procedimento		Ptos Fixos	
D(X,Y,Z) (m)	EV (m)	D(X,Y,Z) (m)	EV (m)
0,005	0,015	0,0072	0,001
0,046	0,025	0,0394	0,001
0,0083	0,112	0,0163	0,075
0,151	0,001	0,1546	0,034
0,0167	0,058	0,0394	0,014
0,0175	0,102	0,0347	0,043
0,0103	0,016	0,0309	0,045
0,1286	0,003	0,06	0,031
0,0227	0,035	0,0269	0,006
0,0148	0,105	0,0297	0,055
0,0952		0,0263	
0,1877		0,0357	

## ANEXOS 7– Dados para avaliação da foto 2

<b>Procedimento</b>			
Pontos	Desvios (m)		
	Afim	Projetiva	Dlt
1	0,2212	0,0027	0,0433
2	0,0822	0,0538	0,0083
3	0,0070	0,0523	0,0376
4	0,0981	0,0098	0,4451
5	0,0091	0,0407	0,0352
6	0,0070	0,0116	0,0145
7	0,0885	0,0383	0,0044
8	0,2262	0,0203	0,0921
9	0,0153	0,0027	0,0496
10	0,0088	0,0175	0,0335
11	0,1023	0,0535	0,0064
12	0,3163	0,0114	0,1062

<b>Pontos Fixos</b>			
Pontos	Desvios (m)		
	Afim	Projetiva	Dlt
1	0,1485	0,0067	0,0765
2	0,0455	0,0251	0,0258
3	0,0969	0,0135	0,0385
4	0,1301	0,1323	0,3326
5	0,0539	0,0408	0,0413
6	0,0773	0,0248	0,0260
7	0,0642	0,0339	0,0036
8	0,0838	0,0414	0,1070
9	0,0553	0,0244	0,0917
10	0,0953	0,0210	0,0539
11	0,0880	0,0293	0,0311
12	0,1185	0,0344	0,1400

Comparação entre Procedimento e Pto Fixos			
Procedimento		Ptos Fixos	
D(X,Y,Z) (m)	EV (m)	D(X,Y,Z) (m)	EV (m)
0,0027	0,0120	0,0067	0,0020
0,0538	0,0270	0,0251	0,0080
0,0523	0,0200	0,0135	0,0660
0,0098	0,0040	0,1323	0,0260
0,0407	0,0000	0,0408	0,0080
0,0116	0,0090	0,0248	0,0450
0,0383	0,0210	0,0339	0,0410
0,0203	0,0100	0,0414	0,0120
0,0027	0,0260	0,0244	0,0120
0,0175	0,0080	0,0210	0,0390
0,0535		0,0293	
0,0114		0,0344	



## ANEXOS 8– Dados para avaliação da foto 3

<b>Procedimento</b>			
Pontos	Desvios (m)		
	Afim	Projetiva	Dlt
1	0,6200	0,0810	0,0339
2	0,0410	0,0119	0,0246
3	0,0949	0,0210	0,0215
4	0,0473	0,0299	0,7089
5	0,5648	0,0107	0,0408
6	0,0513	0,0049	0,0253
7	0,1468	0,0122	0,0131
8	0,3796	0,0176	0,1037
9	0,6029	0,0113	0,0481
10	0,0266	0,0240	0,0368
11	0,4259	0,0540	0,0330
12	0,7886	0,0099	0,1301

<b>Pontos Fixos</b>			
Pontos	Desvios (m)		
	Afim	Projetiva	Dlt
1	0,4163	0,0166	0,0383
2	0,1832	0,0415	0,0276
3	0,3055	0,0067	0,0261
4	0,5334	0,1248	0,3063
5	0,0614	0,0279	0,0247
6	0,2644	0,0290	0,0341
7	0,2093	0,0222	0,0117
8	0,3202	0,0357	0,0817
9	0,2342	0,0126	0,0487
10	0,3230	0,0158	0,0220
11	0,2221	0,0308	0,0092
12	0,3760	0,0195	0,0699

Comparação entre Procedimento e Pto Fixos			
Procedimento		Ptos Fixos	
D(X,Y,Z) (m)	EV (m)	D(X,Y,Z) (m)	EV (m)
0,0810	0,0400	0,0166	0,0170
0,0119	0,0120	0,0415	0,0020
0,0210	0,0020	0,0067	0,0490
0,0299	0,0110	0,1248	0,0230
0,0107	0,0000	0,0279	0,0040
0,0049	0,0070	0,0290	0,0350
0,0122	0,0350	0,0222	0,0190
0,0176	0,0020	0,0357	0,0270
0,0113	0,0190	0,0126	0,0260
0,0240	0,0080	0,0158	0,0230
0,0540		0,0308	
0,0099		0,0195	

## ANEXOS 9– Dados para avaliação da foto 4

<b>Procedimento</b>			
Pontos	Desvios (m)		
	Afim	Projetiva	Dlt
1	0,0372	0,0141	0,1138
2	0,0388	0,0513	0,0261
3	0,2948	0,0302	0,0320
4	0,9418	0,0143	0,3181
5	0,0311	0,0459	0,0653
6	0,0924	0,0146	0,0051
7	0,0498	0,0252	0,0103
8	0,5436	0,0329	0,0482
9	0,3103	0,0139	0,0831
10	0,2271	0,0113	0,0437
11	0,0373	0,0555	0,0079
12	0,3936	0,0030	0,1085

<b>Pontos Fixos</b>			
Pontos	Desvios (m)		
	Afim	Projetiva	Dlt
1	0,1679	0,0203	0,1292
2	0,1209	0,0418	0,0436
3	0,2167	0,0048	0,0335
4	0,7615	0,0760	0,2905
5	0,1077	0,0381	0,0753
6	0,1535	0,0116	0,0316
7	0,0866	0,0195	0,0116
8	0,3279	0,0237	0,0765
9	0,1943	0,0228	0,1157
10	0,2167	0,0225	0,0502
11	0,1394	0,0387	0,0153
12	0,1943	0,0157	0,0823

Comparação entre Procedimento e Pto Fixos			
Procedimento		Ptos Fixos	
D(X,Y,Z) (m)	EV (m)	D(X,Y,Z) (m)	EV (m)
0,0141	0,0180	0,0203	0,0210
0,0513	0,0350	0,0418	0,0230
0,0302	0,0110	0,0048	0,0330
0,0143	0,0090	0,0760	0,0150
0,0459	0,0150	0,0381	0,0190
0,0146	0,0000	0,0116	0,0140
0,0252	0,0000	0,0195	0,0130
0,0329	0,0160	0,0237	0,0220
0,0139	0,0210	0,0228	0,0220
0,0113	0,0160	0,0225	0,0210
0,0555		0,0387	
0,0030		0,0157	

## ANEXOS 10– Dados para avaliação da foto 5

<b>Procedimento</b>			
Pontos	Desvios (m)		
	Afim	Projetiva	Dlt
1	0,9241	0,0188	0,0657
2	0,8571	0,0226	0,0283
3	0,9466	0,0354	0,0270
4	1,1550	0,0034	0,4515
5	0,0044	0,0136	0,0392
6	0,0398	0,0463	0,0154
7	0,0131	0,0119	0,0166
8	0,0088	0,0088	0,0860
9	0,3357	0,0060	0,0631
10	0,0000	0,0608	0,0267
11	0,2283	0,0688	0,0888
12	0,6099	0,0098	0,1203

<b>Pontos Fixos</b>			
Pontos	Desvios (m)		
	Afim	Projetiva	Dlt
1	0,5055	0,0232	0,0598
2	0,1373	0,0317	0,0460
3	0,4509	0,0312	0,0244
4	0,9558	0,0856	0,0968
5	0,2724	0,0273	0,0369
6	0,2860	0,0702	0,0378
7	0,3284	0,0008	0,0032
8	0,3777	0,0361	0,0470
9	0,3800	0,0396	0,0774
10	0,1170	0,0658	0,0094
11	0,0869	0,0323	0,0385
12	0,3578	0,0216	0,1175

Comparação entre Procedimento e Pto Fixos			
Procedimento		Ptos Fixos	
D(X,Y,Z) (m)	EV (m)	D(X,Y,Z) (m)	EV (m)
0,0188	0,0050	0,0232	0,0100
0,0226	0,0530	0,0317	0,0670
0,0354	0,0070	0,0312	0,0330
0,0034	0,0390	0,0856	0,0670
0,0136	0,0590	0,0273	0,0590
0,0463	0,0300	0,0702	0,0030
0,0119	0,0010	0,0008	0,0450
0,0088	0,0520	0,0361	0,0230
0,0060	0,0320	0,0396	0,0210
0,0608	0,0050	0,0658	0,0100
0,0688		0,0323	
0,0098		0,0216	

## ANEXOS 11– Arquivo DXF das entidades extraídas

0	472.787500	20	108.668681	10
SECTION	0	105.098045	31	509.760528
2	LINE	30	473.588241	20
HEADER	8	474.659951	0	105.062410
0	TESTE	11	LINE	30
ENDSEC	10	506.628219	8	472.695900
0	503.399220	21	TESTE	11
SECTION	20	105.066625	10	506.628219
2	101.201811	31	506.570351	21
ENTITIES	30	473.674600	20	105.066625
0	474.692901	0	108.668681	31
POINT	11	LINE	30	473.674600
8	509.772681	8	473.588241	0
TESTE	21	TESTE	11	LINE
10	105.062394	10	509.764622	8
503.399220	31	506.628219	21	TESTE
20	472.695900	20	108.715612	10
101.201811	0	105.066625	31	506.628219
30	LINE	30	472.683237	20
474.692901	8	473.674600	0	105.066625
0	TESTE	11	LINE	30
POINT	10	503.330445	8	473.674600
8	509.804016	21	TESTE	11
TESTE	20	108.720917	10	506.570351
10	101.176003	31	509.764622	21
506.589250	30	474.669079	20	108.668681
20	472.787500	0	108.715612	31
101.178213	11	LINE	30	473.588241
30	503.381539	8	472.683237	0
473.701113	21	TESTE	11	ENDSEC
0	105.111633	10	509.760528	0
POINT	31	503.330445	21	EOF
8	474.660033	20	105.062410	
TESTE	0	108.720917	31	
10	LINE	30	472.695900	
509.804016	8	474.669079	0	
20	TESTE	11	LINE	
101.176003	10	506.570351	8	
30	503.405924	21	TESTE	

## ANEXOS 12– Dados da imagem hipotética

Ponto	Fotocoordenadas		Espaço Objeto		
	x	y	X	Y	Z
1	-100.0290	-100.0294	50	50	50
2	-54.6422	-105.2848	100	50	53
3	-0.0001	-101.7107	150	50	51
4	54.5570	-109.1149	200	50	55
5	115.4288	-115.4296	250	50	58
6	-101.7139	-50.8572	50	100	51
7	-50.0037	-50.0039	100	100	50
8	-0.0001	-50.0021	150	100	50
9	54.5501	-54.5504	200	100	55
10	120.0311	-60.0159	250	100	60
11	-90.9199	0.0000	50	150	44
12	-46.1553	0.0000	100	150	45
13	0.0000	0.0000	150	150	48
14	50.0018	0.0000	200	150	50
15	109.1096	0.0000	250	150	55
16	-88.2476	44.1241	50	200	42
17	-44.1201	44.1204	100	200	42
18	0.0001	46.1555	150	200	45
19	50.0037	50.0039	200	200	50
20	101.7139	50.8572	250	200	51
21	-85.7323	85.7329	50	250	40
22	-44.7825	89.5657	100	250	43
23	0.0001	100.0150	150	250	50
24	52.6422	105.2848	200	250	53
25	100.0290	100.0294	250	250	50



## ANEXOS 13— Relatório do SIFAR1.0

```
*****
SIFAR1.0 - Análise de Precisão
Nome do Projeto      : Tese
Arquivo em análise   : d:\fraga\imghip\imghip.bmp
Data : 01/03/98
Responsável          : FragaSSI
Resolução            : 600 dpi
Número total de pontos levantados : 25
Número total de testes efetuados  :
*****
Relatório do uso da equação Afim *****
*****
Parâmetros da Equação Afim :
```

```
a1 : 1,67571428571429
a2 : 5,46490273366285E-16
a3 : -55,2802197802199
a4 : -0,000714285714285577
a5 : 1,235
a6 : -37,0659340659341
```

```
Números de pontos Transformados = 13
Erro Médio Quadrático Geral = 7,6025 m
Erro Médio Quadrático com Pontos de Transformação = 8,6774 m
Erro Médio Quadrático com Pontos de Controle = 7,5938 m
Variância Geral = 14,561513 m²
Variância PT = 17,525438 m²
Variância PC = 12,589910 m²
Maior Erro = 17,1026 m
Estação do maior erro = 10
Menor Erro = 1,0487 m
Estação do menor erro = 9
Sigma a posteriori = 83,03873626
```

Coordenas do Espaço Objeto			Coordenas Trans. do Espaço Objeto				
Xr	Yr	Zr	Xt	Yt	Zt	Desvios	
x	50,0000	50,0000	50,0000	45,5210	53,5210	50,0461	5,6974
-	100,0000	50,0000	53,0000	93,2619	48,6903	52,8511	6,8659
x	150,0000	50,0000	51,0000	145,1800	51,9592	51,0492	5,2032
-	200,0000	50,0000	55,0000	200,0820	44,7035	54,9895	5,2971
x	250,0000	50,0000	58,0000	260,9515	38,2610	57,8523	16,0550
-	50,0000	100,0000	51,0000	44,3275	102,1033	50,8701	6,0513
x	100,0000	100,0000	50,0000	95,6489	102,9427	49,9814	5,2528
-	150,0000	100,0000	50,0000	145,1800	102,1616	49,9865	5,2825
x	200,0000	100,0000	55,0000	200,0820	98,9545	55,0000	1,0487
-	250,0000	100,0000	60,0000	265,7256	93,3245	59,1999	17,1026
x	50,0000	150,0000	44,0000	54,4724	153,1213	44,0585	5,4542
-	100,0000	150,0000	45,0000	99,2295	153,1472	44,9936	3,2402
x	150,0000	150,0000	48,0000	145,7768	153,1741	47,9440	5,2834
-	200,0000	150,0000	50,0000	195,3079	153,2028	50,0243	5,6810
x	250,0000	150,0000	55,0000	254,3872	153,2370	54,9498	5,4523
-	50,0000	200,0000	42,0000	57,4562	196,8478	42,0117	8,0952
x	100,0000	200,0000	42,0000	101,6165	196,8733	42,0322	3,5200
-	150,0000	200,0000	45,0000	145,7768	199,3280	45,0309	4,2765
x	200,0000	200,0000	50,0000	195,3079	203,4052	49,9660	5,7976
-	250,0000	200,0000	51,0000	247,8228	204,2453	51,0099	4,7710
x	50,0000	250,0000	40,0000	59,8433	238,9544	40,5929	14,8070
-	100,0000	250,0000	43,0000	100,4230	243,0264	43,0502	6,9865
x	150,0000	250,0000	50,0000	145,7768	252,7693	49,8986	5,0512
-	200,0000	250,0000	53,0000	198,2917	257,6580	52,8122	7,8484
x	250,0000	250,0000	50,0000	245,4358	252,8269	50,0505	5,3690

```
*****
```

\*\*\*\*\* Análise de distâncias - Trena - Calculada \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Direção	D. Trena	D. Calc	EV	ER	ER %	precisão
1-2	50.090	48.067	2.023	0.04040	4.040 %	1:25
2-3	50.040	52.052	2.012	0.04021	4.021 %	1:25
3-4	50.160	55.519	5.359	0.10684	10.684 %	1:9
4-5	50.090	61.276	11.186	0.22333	22.333 %	1:4
6-7	50.010	51.336	1.326	0.02651	2.651 %	1:38
7-8	50.000	49.537	0.463	0.00925	0.925 %	1:108
8-9	50.249	55.224	4.975	0.09900	9.900 %	1:10
9-10	50.249	66.018	15.769	0.31382	31.382 %	1:3
11-12	50.010	44.767	5.243	0.10484	10.484 %	1:10
12-13	50.090	46.641	3.449	0.06886	6.886 %	1:15
13-14	50.040	49.575	0.465	0.00930	0.930 %	1:108
14-15	50.249	59.284	9.035	0.17981	17.981 %	1:6
16-17	50.000	44.160	5.840	0.11679	11.679 %	1:9
17-18	50.090	44.330	5.760	0.11499	11.499 %	1:9
18-19	50.249	49.943	0.306	0.00609	0.609 %	1:164
19-20	50.010	52.532	2.522	0.05043	5.043 %	1:20
21-22	50.090	40.857	9.233	0.18432	18.432 %	1:5
22-23	50.488	46.891	3.597	0.07124	7.124 %	1:14
23-24	50.090	52.822	2.732	0.05455	5.455 %	1:18
24-25	50.090	47.471	2.619	0.05228	5.228 %	1:19
1-6	50.010	48.604	1.406	0.02812	2.812 %	1:36
6-11	50.488	52.461	1.973	0.03908	3.908 %	1:26
11-16	50.040	43.876	6.164	0.12318	12.318 %	1:8
16-21	50.040	42.198	7.842	0.15671	15.671 %	1:6
2-7	50.090	54.381	4.291	0.08566	8.566 %	1:12
7-12	50.249	50.579	0.330	0.00656	0.656 %	1:152
12-17	50.090	43.891	6.199	0.12375	12.375 %	1:8
17-22	50.010	46.180	3.830	0.07659	7.659 %	1:13
3-8	50.010	50.214	0.204	0.00407	0.407 %	1:246
8-13	50.040	51.057	1.017	0.02032	2.032 %	1:49
13-18	50.090	46.246	3.844	0.07675	7.675 %	1:13
18-23	50.249	53.663	3.414	0.06793	6.793 %	1:15
4-9	50.000	54.251	4.251	0.08502	8.502 %	1:12
9-14	50.249	54.685	4.436	0.08828	8.828 %	1:11
14-19	50.000	50.202	0.202	0.00405	0.405 %	1:247
19-24	50.090	54.409	4.319	0.08623	8.623 %	1:12
5-10	50.040	55.286	5.246	0.10485	10.485 %	1:10
10-15	50.249	61.124	10.875	0.21642	21.642 %	1:5
15-20	50.160	51.580	1.420	0.02830	2.830 %	1:35
20-25	50.010	48.650	1.360	0.02720	2.720 %	1:37

Erro Verdadeiro Médio :4.163436 m  
 Desvio Médio :2.554074 m  
 Desvio-padrão :3.442127 m

Erro Relativo Percentual Médio :8.304857 %  
 Desvio Médio :5.094900 %  
 Desvio-padrão :6.858959 %

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* Relatório do uso da equação Projetiva \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*  
 Parâmetros da Equação Projetiva :

a1 : 1,49597910026119  
 a2 : 0,135201636102639  
 a3 : -58,1552392608371  
 a4 : -0,000752848454084557  
 a5 : 0,000658938291099608  
 a6 : -0,107221098967893  
 a7 : 1,30965740450694  
 a8 : -29,9895767442138

Números de pontos Transformados = 13

Erro Médio Quadrático Geral = 3,6172 m  
 Erro Médio Quadrático com Pontos de Transformação = 3,3200 m  
 Erro Médio Quadrático com Pontos de Controle = 4,3580 m  
 Variância Geral = 6,304778 m<sup>2</sup>  
 Variância PT = 3,718984 m<sup>2</sup>  
 Variância PC = 8,804118 m<sup>2</sup>  
 Maior Erro = 8,5386 m  
 Estação do maior erro = 24  
 Menor Erro = 0,1857 m  
 Estação do menor erro = 5  
 Sigma a posteriori = 8,26223000

Coordenas do Espaço Objeto			Coordenas Trans. do Espaço Objeto				
	Xr	Yr	Zr	Xt	Yt	Zt	Desvios
x	50,0000	50,0000	50,0000	48,4320	48,9134	50,0055	1,9077
-	100,0000	50,0000	53,0000	99,1544	47,8208	52,9831	2,3376
x	150,0000	50,0000	51,0000	149,9477	54,2000	51,0329	4,2005
-	200,0000	50,0000	55,0000	199,6093	51,3847	54,9991	1,4388
x	250,0000	50,0000	58,0000	250,0381	49,8182	58,0000	0,1857
-	50,0000	100,0000	51,0000	43,2474	96,5050	50,8278	7,6054
x	100,0000	100,0000	50,0000	99,4351	99,1030	50,0019	1,0600
-	150,0000	100,0000	50,0000	149,6316	99,9250	49,9999	0,3759
x	200,0000	100,0000	55,0000	200,9747	98,6541	55,0004	1,6618
-	250,0000	100,0000	60,0000	256,9379	95,7280	59,7441	8,1516
x	50,0000	150,0000	44,0000	50,8279	150,1639	44,0017	0,8439
-	100,0000	150,0000	45,0000	101,2030	149,8635	45,0030	1,2108
x	150,0000	150,0000	48,0000	149,8903	149,5732	48,0001	0,4407
-	200,0000	150,0000	50,0000	197,9876	149,2864	50,0054	2,1351
x	250,0000	150,0000	55,0000	250,9075	148,9709	54,9974	1,3721
-	50,0000	200,0000	42,0000	50,8442	198,9545	42,0001	1,3438
x	100,0000	200,0000	42,0000	102,0226	196,8677	42,0364	3,7288
-	150,0000	200,0000	45,0000	149,5782	197,5291	45,0129	2,5067
x	200,0000	200,0000	50,0000	199,2899	199,5903	49,9994	0,8198
-	250,0000	200,0000	51,0000	248,0862	198,1478	51,0065	2,6633
x	50,0000	250,0000	40,0000	50,2583	248,8624	40,0033	1,1665
-	100,0000	250,0000	43,0000	98,6513	249,9516	43,0018	1,3495
x	150,0000	250,0000	50,0000	149,1907	257,0771	49,8448	7,1249
-	200,0000	250,0000	53,0000	203,7810	257,6526	52,7785	8,5386
x	250,0000	250,0000	50,0000	248,7699	248,2693	50,0076	2,1234

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* Análise de distâncias - Trena - Calculada \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Direção	D. Trena	D. Calc	EV	ER	ER %	precisão
1-2	50.090	50.822	0.732	0.01460	1.460 %	1:68
2-3	50.040	51.229	1.189	0.02377	2.377 %	1:42
3-4	50.160	49.899	0.261	0.00520	0.520 %	1:192
4-5	50.090	50.542	0.452	0.00903	0.903 %	1:111
6-7	50.010	56.254	6.244	0.12485	12.485 %	1:8
7-8	50.000	50.203	0.203	0.00406	0.406 %	1:246
8-9	50.249	51.602	1.353	0.02692	2.692 %	1:37
9-10	50.249	56.240	5.991	0.11923	11.923 %	1:8
11-12	50.010	50.386	0.376	0.00752	0.752 %	1:133
12-13	50.090	48.780	1.310	0.02615	2.615 %	1:38
13-14	50.040	48.140	1.900	0.03797	3.797 %	1:26
14-15	50.249	53.156	2.907	0.05785	5.785 %	1:17
16-17	50.000	51.221	1.221	0.02442	2.442 %	1:41
17-18	50.090	47.653	2.437	0.04865	4.865 %	1:21
18-19	50.249	50.004	0.245	0.00488	0.488 %	1:205
19-20	50.010	48.828	1.182	0.02363	2.363 %	1:42
21-22	50.090	48.498	1.592	0.03178	3.178 %	1:31
22-23	50.488	51.496	1.008	0.01996	1.996 %	1:50
23-24	50.090	54.672	4.582	0.09148	9.148 %	1:11
24-25	50.090	46.040	4.050	0.08085	8.085 %	1:12
1-6	50.010	47.880	2.130	0.04259	4.259 %	1:23
6-11	50.488	54.620	4.132	0.08184	8.184 %	1:12
11-16	50.040	48.832	1.208	0.02415	2.415 %	1:41
16-21	50.040	49.951	0.089	0.00177	0.177 %	1:564
2-7	50.090	51.370	1.280	0.02555	2.555 %	1:39

7-12	50.249	51.037	0.788	0.01567	1.567 %	1:64
12-17	50.090	47.105	2.985	0.05959	5.959 %	1:17
17-22	50.010	53.200	3.190	0.06378	6.378 %	1:16
3-8	50.010	45.738	4.272	0.08543	8.543 %	1:12
8-13	50.040	49.689	0.351	0.00701	0.701 %	1:143
13-18	50.090	48.050	2.040	0.04073	4.073 %	1:25
18-23	50.249	59.745	9.496	0.18898	18.898 %	1:5
4-9	50.000	47.289	2.711	0.05422	5.422 %	1:18
9-14	50.249	50.966	0.717	0.01426	1.426 %	1:70
14-19	50.000	50.321	0.321	0.00642	0.642 %	1:156
19-24	50.090	58.302	8.212	0.16394	16.394 %	1:6
5-10	50.040	46.458	3.582	0.07158	7.158 %	1:14
10-15	50.249	53.793	3.544	0.07053	7.053 %	1:14
15-20	50.160	49.419	0.741	0.01477	1.477 %	1:68
20-25	50.010	50.136	0.126	0.00252	0.252 %	1:397

Erro Verdadeiro Médio :2.278669 m  
Desvio Médio :1.707683 m  
Desvio-padrão :2.227518 m

Erro Relativo Percentual Médio :4.545317 %  
Desvio Médio :3.404956 %  
Desvio-padrão :4.440388 %

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\* Relat6rio do uso da equa66o DLT \*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
Orienta66o Externa da c6mara :

Angulo de rota66o Capa : 39° 56' 55,26"  
Angulo de rota66o Ki : 0° 2' 36,10"  
Angulo de rota66o Omega : 0° 0' 3,08"  
Xc : -147,99742214515 m  
Yc : -149,327916275848 m  
Zc : -110,026576281077 m

Orienta66o Interna da c6mara :

K1 : -3,12843187776337E-8  
Xo : 185,448968028257 mm  
Yo : 151,225965105985 mm  
f : 114,915866586421 mm

Parametros da DLT:

L1 : 0,912706704299243  
L2 : 0,00163661149763585  
L3 : -1,68655626536611  
L4 : 50,2431877822305  
L5 : 0,000634935241616492  
L6 : 0,671619971297004  
L7 : -1,37586967291662  
L8 : 50,9964927727543  
L9 : 6,8856065476645E-6  
L10 : 1,35979811133355E-7  
L11 : -0,00909816910107571  
K : -3,12843187776337E-8

N6meros de pontos Transformados = 13  
Erro M6dio Quadr6tico Geral = 0,4633 m  
Erro M6dio Quadr6tico com Pontos de Transforma66o = 0,3709 m  
Erro M6dio Quadr6tico com Pontos de Controle = 0,6058 m  
Vari6ncia Geral = 0,086262 m<sup>2</sup>  
Vari6ncia PT = 0,019407 m<sup>2</sup>  
Vari6ncia PC = 0,127843 m<sup>2</sup>  
Maior Erro = 1,3078 m  
Esta66o do maior erro = 8  
Menor Erro = 0,0415 m  
Esta66o do menor erro = 15  
Sigma a posteriori = 0,13490094

Coordenas do Espaço Objeto			Coordenas Trans. do Espaço Objeto				
	Xr	Yr	Zr	Xt	Yt	Zt	Desvios
x	50,0000	50,0000	50,0000	49,9619	50,1399	50,0000	0,1450
-	100,0000	50,0000	53,0000	100,2192	50,3789	52,9994	0,4377
x	150,0000	50,0000	51,0000	149,7245	50,0370	51,0002	0,2779
-	200,0000	50,0000	55,0000	200,1570	50,0447	55,0000	0,1632
x	250,0000	50,0000	58,0000	250,2921	49,8589	57,9999	0,3244
-	50,0000	100,0000	51,0000	50,3020	99,6255	50,9992	0,4811
x	100,0000	100,0000	50,0000	99,9785	99,5606	50,0003	0,4400
-	150,0000	100,0000	50,0000	149,6617	98,7367	50,0041	1,3078
x	200,0000	100,0000	55,0000	200,0861	99,9712	55,0000	0,0908
-	250,0000	100,0000	60,0000	250,3134	99,7442	59,9992	0,4045
x	50,0000	150,0000	44,0000	49,7514	149,9556	44,0002	0,2525
-	100,0000	150,0000	45,0000	99,7624	149,9795	45,0000	0,2385
x	150,0000	150,0000	48,0000	150,2420	149,9805	48,0000	0,2428
-	200,0000	150,0000	50,0000	199,9309	149,9892	50,0000	0,0700
x	250,0000	150,0000	55,0000	250,0200	149,9636	55,0000	0,0415
-	50,0000	200,0000	42,0000	50,0782	199,6402	42,0000	0,3682
x	100,0000	200,0000	42,0000	100,1669	199,7308	42,0002	0,3167
-	150,0000	200,0000	45,0000	150,2629	200,2181	45,0006	0,3416
x	200,0000	200,0000	50,0000	199,8362	200,4239	49,9999	0,4545
-	250,0000	200,0000	51,0000	250,8502	200,4020	51,0007	0,9404
x	50,0000	250,0000	40,0000	49,9261	250,3293	40,0003	0,3375
-	100,0000	250,0000	43,0000	99,4621	250,6633	43,0008	0,8540
x	150,0000	250,0000	50,0000	149,9972	249,9291	50,0000	0,0710
-	200,0000	250,0000	53,0000	199,9851	249,6093	52,9994	0,3910
x	250,0000	250,0000	50,0000	250,0769	250,0391	50,0000	0,0862

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* Análise de distâncias - Trena - Calculada \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Direção	D. Trena	D. Calc	EV	ER	ER %	precisão
1-2	50.090	50.347	0.257	0.00514	0.514 %	1:195
2-3	50.040	49.547	0.493	0.00985	0.985 %	1:101
3-4	50.160	50.591	0.431	0.00859	0.859 %	1:116
4-5	50.090	50.225	0.135	0.00270	0.270 %	1:371
6-7	50.010	49.687	0.323	0.00647	0.647 %	1:155
7-8	50.000	49.690	0.310	0.00620	0.620 %	1:161
8-9	50.249	50.686	0.437	0.00870	0.870 %	1:115
9-10	50.249	50.476	0.227	0.00452	0.452 %	1:221
11-12	50.010	50.021	0.011	0.00022	0.022 %	1:4549
12-13	50.090	50.569	0.479	0.00956	0.956 %	1:105
13-14	50.040	49.729	0.311	0.00621	0.621 %	1:161
14-15	50.249	50.338	0.089	0.00177	0.177 %	1:564
16-17	50.000	50.089	0.089	0.00177	0.177 %	1:563
17-18	50.090	50.188	0.098	0.00196	0.196 %	1:510
18-19	50.249	49.825	0.424	0.00843	0.843 %	1:119
19-20	50.010	51.024	1.014	0.02027	2.027 %	1:49
21-22	50.090	49.628	0.462	0.00922	0.922 %	1:108
22-23	50.488	51.023	0.535	0.01059	1.059 %	1:94
23-24	50.090	50.079	0.011	0.00022	0.022 %	1:4488
24-25	50.090	50.183	0.093	0.00186	0.186 %	1:537
1-6	50.010	49.497	0.513	0.01026	1.026 %	1:97
6-11	50.488	50.817	0.329	0.00652	0.652 %	1:153
11-16	50.040	49.726	0.314	0.00628	0.628 %	1:159
16-21	50.040	50.729	0.689	0.01376	1.376 %	1:73
2-7	50.090	49.274	0.816	0.01630	1.630 %	1:61
7-12	50.249	50.667	0.418	0.00831	0.831 %	1:120
12-17	50.090	49.843	0.247	0.00493	0.493 %	1:203
17-22	50.010	50.947	0.937	0.01874	1.874 %	1:53
3-8	50.010	48.710	1.300	0.02600	2.600 %	1:38
8-13	50.040	51.286	1.246	0.02491	2.491 %	1:40
13-18	50.090	50.327	0.237	0.00473	0.473 %	1:211
18-23	50.249	49.962	0.287	0.00570	0.570 %	1:175
4-9	50.000	49.927	0.073	0.00147	0.147 %	1:680
9-14	50.249	50.268	0.019	0.00037	0.037 %	1:2714
14-19	50.000	50.435	0.435	0.00870	0.870 %	1:115
19-24	50.090	49.277	0.813	0.01623	1.623 %	1:62

5-10	50.040	49.925	0.115	0.00229	0.229 %	1:436
10-15	50.249	50.468	0.219	0.00437	0.437 %	1:229
15-20	50.160	50.604	0.444	0.00884	0.884 %	1:113
20-25	50.010	49.653	0.357	0.00713	0.713 %	1:140

Erro Verdadeiro Médio :0.400930 m  
 Desvio Médio :0.233432 m  
 Desvio-padrão :0.317918 m

Erro Relativo Percentual Médio :0.800279 %  
 Desvio Médio :0.466126 %  
 Desvio-padrão :0.635456 %

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* Teste de uso da equação de colinidade \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*  
 Orientação Externa da câmara :

Angulo de rotação Capa : 0° 0' 0,05"  
 Angulo de rotação Fi : 0° 0' 0,04"  
 Angulo de rotação Omega : 0° 0' 0,05"  
 Xc : 150,00040357774 m  
 Yc : 149,99961183896 m  
 Zc : 110,00020811294 m

Orientação Interna da câmara :

K : 0,00000001439  
 A : 0,00000083720  
 B : 0,00000554073  
 Xo : 0,00039232224 mm  
 Yo : -0,00036160284 mm  
 f : -60,00024584729 mm

Parâmetros da Equação Afim que relaciona pixel-fotocoordenadas :

a1 : 0,59754093239  
 a2 : 0,00115828264  
 a3 : -112,98160420538  
 a4 : -0,00009606354  
 a5 : 0,81228043778  
 a6 : -123,44311476299

Erro Médio Quadrático das fotocoordenadas = 0,6147 mm

Números de pontos Transformados = 13  
 Erro Médio Quadrático Geral = 0,4654 m  
 Erro Médio Quadrático com Pontos de Transformação = 0,4674 m  
 Erro Médio Quadrático com Pontos de Controle = 0,5690 m  
 Variância Geral = 0,065817 m<sup>2</sup>  
 Variância PT = 0,023364 m<sup>2</sup>  
 Variância PC = 0,101675 m<sup>2</sup>  
 Maior Erro = 1,2822 m  
 Estação do maior erro = 8  
 Menor Erro = 0,1332 m  
 Estação do menor erro = 10  
 Sigma a posteriori = 0,00000000

Coordenas do Espaço Objeto			Coordenas Trans. do Espaço Objeto				
	Xr	Yr	Zr	Xt	Yt	Zt	Desvios
x	50,0000	50,0000	50,0000	49,6299	50,1408	50,0002	0,3960
-	100,0000	50,0000	53,0000	100,0362	50,4871	52,9992	0,4884
x	150,0000	50,0000	51,0000	149,3978	50,1793	51,0008	0,6283
-	200,0000	50,0000	55,0000	199,8110	50,2436	55,0000	0,3083
x	250,0000	50,0000	58,0000	249,8804	50,0628	58,0000	0,1351
-	50,0000	100,0000	51,0000	50,1848	99,7098	50,9996	0,3440
x	100,0000	100,0000	50,0000	99,8684	99,6562	50,0002	0,3682
-	150,0000	100,0000	50,0000	149,4593	98,8374	50,0039	1,2822
x	200,0000	100,0000	55,0000	199,8885	100,1138	54,9999	0,1594
-	250,0000	100,0000	60,0000	250,0990	99,9109	59,9999	0,1332
x	50,0000	150,0000	44,0000	49,5892	150,0221	44,0004	0,4114

-	100,0000	150,0000	45,0000	99,6499	150,0139	45,0000	0,3504
x	150,0000	150,0000	48,0000	150,1340	150,0055	48,0000	0,1341
-	200,0000	150,0000	50,0000	199,7237	149,9974	50,0001	0,2763
x	250,0000	150,0000	55,0000	249,7917	149,9889	54,9999	0,2086
-	50,0000	200,0000	42,0000	50,0043	199,7265	42,0000	0,2735
x	100,0000	200,0000	42,0000	100,1070	199,7225	42,0002	0,2974
-	150,0000	200,0000	45,0000	150,2119	200,1620	45,0004	0,2667
x	200,0000	200,0000	50,0000	199,7938	200,3549	49,9999	0,4105
-	250,0000	200,0000	51,0000	250,6560	200,2997	51,0004	0,7212
x	50,0000	250,0000	40,0000	49,9295	250,4517	40,0005	0,4572
-	100,0000	250,0000	43,0000	99,5849	250,6799	43,0007	0,7966
x	150,0000	250,0000	50,0000	150,2720	249,9014	49,9997	0,2893
-	200,0000	250,0000	53,0000	200,2104	249,5234	52,9990	0,5210
x	250,0000	250,0000	50,0000	250,0325	249,8704	50,0000	0,1336

	Fotocoordenada Real	Fotocoordenada Trans.	Desvio
x-100,0290	-100,0294	-100,3997	-99,8890
-	-54,6422	-105,2848	-52,6033
x	-0,0001	-101,7107	-0,6126
-	54,5570	-109,1149	54,3507
x	115,4288	-115,4296	115,2906
-	-101,7139	-50,8572	-101,5252
x	-50,0037	-50,0039	-50,1356
-	-0,0001	-50,0021	-0,5408
x	54,5501	-54,5504	54,4283
-	-120,0311	-60,0159	-120,1497
x	-90,9199	0,0000	-91,2941
-	-46,1553	0,0000	-46,4785
x	0,0000	0,0000	0,1297
-	50,0018	0,0000	49,7256
x	109,1096	0,0000	108,8821
-	-88,2476	44,1241	-88,2438
x	-44,1201	44,1204	-44,0258
-	0,0001	46,1555	0,1957
x	50,0037	50,0039	49,7974
-	-101,7139	50,8572	102,3822
x	-85,7323	85,7329	-85,7934
-	-44,7825	89,5657	-45,1549
x	0,0001	100,0150	0,2722
-	52,6422	105,2848	52,8627
x	100,0290	100,0294	100,0615

Fotocoord. Trans.		Correc. Não Ortogonal		Correc. Radial		Fotocoord. Corrig.	
Xtc	Ytc	Ox	Oy	Rx	Ry	Xt	Yt
x-100,3997	-99,8890	-0,0001	-0,0001	-0,0289	-0,0289	-100,3711	-99,8592
- -52,6033	-104,7704	-0,0001	-0,0001	-0,0108	-0,0208	-52,5928	-104,7486
x -0,6126	-101,5296	-0,0001	-0,0001	0,0000	-0,0151	-0,6129	-101,5136
- 54,3507	-108,8490	-0,0001	-0,0001	0,0116	-0,0232	54,3388	-108,8248
x 115,2906	-115,3570	-0,0001	-0,0001	0,0442	-0,0442	115,2461	-115,3118
--101,5252	-51,1520	0,0000	0,0000	-0,0189	-0,0095	-101,5067	-51,1419
x -50,1356	-50,3480	0,0000	0,0000	-0,0036	-0,0036	-50,1323	-50,3437
- -0,5408	-51,1682	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0019	-0,5412	-51,1657
x 54,4283	-54,4262	0,0000	0,0000	0,0047	-0,0047	54,4233	-54,4209
- 120,1497	-60,1227	-0,0001	-0,0001	0,0312	-0,0156	120,1182	-60,1064
x -91,2941	0,0201	0,0000	0,0000	-0,0109	0,0000	-91,2836	0,0204
- -46,4785	0,0128	0,0000	0,0000	-0,0014	0,0000	-46,4775	0,0132
x 0,1297	0,0054	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1293	0,0057
- 49,7256	-0,0026	0,0000	0,0000	0,0018	0,0000	49,7234	-0,0023
x 108,8821	-0,0121	0,0000	0,0000	0,0186	0,0000	108,8631	-0,0118
- -88,2438	43,8827	0,0000	0,0000	-0,0123	0,0062	-88,2319	43,8767
x -44,0258	43,8756	0,0000	0,0000	-0,0025	0,0025	-44,0238	43,8733
- 0,1957	46,3053	0,0000	0,0000	0,0000	0,0014	0,1953	46,3040
x 49,7974	50,3588	0,0000	0,0000	0,0036	0,0036	49,7934	50,3552
- 102,3822	51,1626	0,0000	0,0000	0,0192	0,0096	102,3626	51,1531
x -85,7934	86,1209	0,0001	0,0001	-0,0182	0,0182	-85,7757	86,1026
- -45,1549	90,1758	0,0001	0,0001	-0,0066	0,0131	-45,1488	90,1625

```

x 0,2722 99,9158 0,0001 0,0001 0,0000 0,0144 0,2717 99,9013
- 52,8627 104,7811 0,0001 0,0001 0,0104 0,0209 52,8518 104,7600
x 100,0615 99,8998 0,0001 0,0001 0,0288 0,0288 100,0322 99,8708

```

```

*****
*****  Análise de distâncias - Trena - Calculada  *****
*****

```

Direção	D. Trena	D. Calc	EV	ER	ER %	precisão
=====						
1-2	50.090	50.497	0.407	0.00812	0.812 %	1:123
2-3	50.040	49.403	0.637	0.01273	1.273 %	1:79
3-4	50.160	50.572	0.412	0.00821	0.821 %	1:122
4-5	50.090	50.160	0.070	0.00139	0.139 %	1:721
6-7	50.010	49.694	0.316	0.00633	0.633 %	1:158
7-8	50.000	49.598	0.402	0.00805	0.805 %	1:124
8-9	50.249	50.692	0.443	0.00882	0.882 %	1:113
9-10	50.249	50.459	0.210	0.00418	0.418 %	1:239
11-12	50.010	50.071	0.061	0.00121	0.121 %	1:824
12-13	50.090	50.573	0.483	0.00965	0.965 %	1:104
13-14	50.040	49.630	0.410	0.00819	0.819 %	1:122
14-15	50.249	50.317	0.068	0.00135	0.135 %	1:739
16-17	50.000	50.103	0.103	0.00205	0.205 %	1:487
17-18	50.090	50.197	0.107	0.00213	0.213 %	1:470
18-19	50.249	49.834	0.415	0.00827	0.827 %	1:121
19-20	50.010	50.872	0.862	0.01724	1.724 %	1:58
21-22	50.090	49.746	0.344	0.00686	0.686 %	1:146
22-23	50.488	51.174	0.686	0.01359	1.359 %	1:74
23-24	50.090	50.030	0.060	0.00120	0.120 %	1:832
24-25	50.090	49.913	0.177	0.00352	0.352 %	1:284
1-6	50.010	49.582	0.428	0.00856	0.856 %	1:117
6-11	50.488	50.800	0.312	0.00618	0.618 %	1:162
11-16	50.040	49.746	0.294	0.00587	0.587 %	1:170
16-21	50.040	50.765	0.725	0.01448	1.448 %	1:69
2-7	50.090	49.261	0.829	0.01656	1.656 %	1:60
7-12	50.249	50.606	0.357	0.00710	0.710 %	1:141
12-17	50.090	49.801	0.289	0.00577	0.577 %	1:173
17-22	50.010	50.970	0.960	0.01919	1.919 %	1:52
3-8	50.010	48.668	1.342	0.02683	2.683 %	1:37
8-13	50.040	51.212	1.172	0.02342	2.342 %	1:43
13-18	50.090	50.246	0.156	0.00312	0.312 %	1:321
18-23	50.249	49.990	0.259	0.00515	0.515 %	1:194
4-9	50.000	49.870	0.130	0.00259	0.259 %	1:386
9-14	50.249	50.134	0.115	0.00229	0.229 %	1:436
14-19	50.000	50.358	0.358	0.00715	0.715 %	1:140
19-24	50.090	49.262	0.828	0.01654	1.654 %	1:60
5-10	50.040	49.889	0.151	0.00302	0.302 %	1:331
10-15	50.249	50.328	0.079	0.00157	0.157 %	1:637
15-20	50.160	50.477	0.317	0.00632	0.632 %	1:158
20-25	50.010	49.585	0.425	0.00850	0.850 %	1:118

Erro Verdadeiro Médio :0.404922 m  
 Desvio Médio :0.229008 m  
 Desvio-padrão :0.311798 m

Erro Relativo Percentual Médio :0.808246 %  
 Desvio Médio :0.457381 %  
 Desvio-padrão :0.623095 %



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 AUTODESK. **DXF - Drawing : Interchange File Format**. Autodesk, 1992.
- 02 ABDEL-AZIZ, Y. I. e KARARA, H. M. **Photogrammetric potentials of non-metric cameras**. Illinois: University of Illinois., 1974. 119 p.
- 03 ALMEIDA, Jair Ferreira de. **Ortofoto Digital**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR. Curitiba. 1995
- 04 AMORIN, Amilton e TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia. Fotogrametria Analítica Aplicada às Câmaras de Pequeno Formato. In : XIV Congresso Brasileiro de Cartografia (14 : Gramado : 1989). **Anais**. Gramado : SBC, 1989.
- 05 ANDRADE, José Bittencourt e OLIVAS, Mary Angélica de Azevedo. Calibração de Câmaras Aerofotogramétrica. In : X Congresso Brasileiro de cartografia ( 10 : Brasília-DF : 1981). **Anais**. Brasília : SBC, 1981.
- 06 Astori B.; Bezoari G. ; Guzzetti F. Analogue and Digital Methods in Architectural Photogrammetry. In : XVII Congress of ISPRS, Commission V (17 : Washington-DC : 1992). **Anais**. Washington-DC : ISPRS,1992.
- 07 ATKINSON, K. B. Intrumentation for Non-Topographic Photogrammetry. In: Karara, H. M. (ed). **Non-Topographic Photogrammetry**. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Cap. III, p. 15 - 35. 1989.
- 08 BARROSO, Leônidas Conceição e outros. **Cálculo Numérico: Com aplicações**. São Paulo: Harbra, 1987. 367 p.
- 09 BEYER, Horst A. Advances in Characterisation and Calibration of Digital Imaging Systems. In : XVII Congress of ISPRS, Commission V (17 : Washington-DC : 1992). **Anais**. Washington-DC : ISPRS,1992.

- 10 BROWN, Duane C. Emerging Trends in Non-Topographic Photogrammetry. In: Karara, H. M. (ed). **Non-Topographic Photogrammetry**. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Cap. XXII, p. 367 - 375. 1989.
- 11 BROWN, Duane C. Close-Range Camera Calibration. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. 37 (8), 1971. p(855 - 866).
- 12 BROWN, Duane C. Decentering Distortion of Lenses. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. 32 (3), 1966. p(444 - 462).
- 13 CANTÚ, Marcos. **Dominando o Delphi**. São Paulo: MAKRON Books., 1996. 1192 p.
- 14 CARBONNELL, Maurice. Architectural Photogrammetry. In: Karara, H. M. (ed). **Non-Topographic Photogrammetry**. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1989. p. 321 - 347.
- 15 CORNELL, Gary e STRAIN, Troy. **Delphi : Segredos e Soluções**. São Paulo: MAKRON Books., 1995. 367 p.
- 16 CRÓSTA, Alvaro Penteado. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. UNICAMP. Campinas, 1992. 170 p.
- 17 CURRAN, Paul J. **Principles of Remote Sensing**. Longman Scientific & Technical. New York, 1992. 282 p.
- 18 DALMOLIN, Quintino. **Notas de Aula – Ajustamento de Observações**. Curitiba, 1995. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – Universidade Federal do Paraná.
- 19 DALMOLIN, Quintino; MACHADO, Rodrigo Villela e SOUZA, Carlos Henrique de. Análise qualitativa na conversão analógico/digital de bases cartográficas para serem utilizadas em SIG's. **BOLETIM DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS**, Curitiba, n. 3, p. 47-50, 1998.

- 20 DAL POZ, Aluir P. Auto Calibração de Câmaras Não Métricas : Uma Abordagem Teórica. In : XIV Congresso Brasileiro de Cartografia (14. : 1989 : Gramado) **Anais**. Gramado : SBC,1989.
- 21 DAL POZ, Aluir P. Modelos matemáticos para monorestituição. In : Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico(2.: 1996 : Florianópolis). **Anais...** Florianópolis: 1995.
- 22 DAMASCENO Jr., Américo. **Delphi :Em windows 95**. São Paulo: Érica, 1995. 191 p.
- 23 DAMASCENO Jr., Américo. **Delphi :Avançado**. São Paulo: Érica, 1995. 219 p.
- 24 DONNELLY, Brian E. e FRYER, John G. Film Unflatness and Small Format Photogrammetry. **Australian Journal of Geodesy Photogrammetry and Surveying**. N. 51, December, 1989. p (57 - 71).
- 25 ELIE, Chahdan Monzier, MIELI, João Carlos, CÉSAR JR., Kléos M. Lenz e EDUARDO, Luiz H. M. **Notas de aulas em Tópicos avançados em Computação Gráfica : Arquivos Padrão DXF**. Universidade federal Fluminense, 1993.
- 26 FAIG, W. Non-Metric and Semi-Metric Camera: Data Reduction. In: Karara, H. M. (ed). **Non-Topographic Photogrammetry**. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Cap. VI, p. 71 - 79. 1989.
- 27 FRYER, J. G; KNIEST, H. T. e DONNELLY, B. E. Radial Lens Distortion and Unflatness in 35mm Camera. **Australian Journal of Geodesy Photogrammetry and Surveying**. N. 53, December, 1990. p(15- 28).
- 28 FRYER, John G. Camera Calibration in Non-Topographic Photogrammetry. In: Karara, H. M. (ed). **Non-Topographic Photogrammetry**. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Cap. V, p. 59 - 69. 1989.

- 29 FELLBAUM, Manfred. Low Cost Surveying Systems in Architectural Photogrammetry. In : XVII Congress of ISPRS, Commission V (17 : Washington-DC : 1992). **Anais**. Washington-DC : ISPRS, 1992.
- 30 GALO, Mauricio. **Calibração de Aplicação de Câmaras Digitais**. Tese de Mestrado em Ciências Geodésicas. UFPR, 1993. 151 p.
- 31 GEMAEL, Camil. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba : UFPR ed, 1994. 319 p.
- 32 GEORGOPOULOS, A. e SPINO, A. FOTOCAD: A Simple Photogrammetric Package for Non-Photogrammetrists. In : XVII Congress of ISPRS, Commission V (17 : Washington-DC : 1992). **Anais**. Washington-DC : ISPRS, 1992.
- 33 GOMES, Camillo et al. Anteprojeto do Cadastro Fotogramétrico de Monumentos Históricos do Brasil. In : Congresso Brasileiro de Cartografia (17.: 1995 : Salvador). **Anais...** Salvador : SBC, 1995.
- 34 GOMES, Camilo José Martins e PIRES JUNIOR, Cristovão Dias de Avila. Primeiros resultados para a restauração do castelo da torre Garcia D'Avila In : Congresso Brasileiro de Cartografia (17.: 1995 : Salvador). **Anais...** Salvador : SBC, 1995.
- 35 GRÜN, Armin e MAAS, Hans-Gerd. Digital Close-Range Photogrammetry a New Technique for Fast and Accurate Measurements. **GIM (International Journal for Surveying, Mapping and Applied GIS)**. 8(3), March, 1994. p (72 - 77).
- 36 JENSEN, John R. **Introductory Digital Image Processing : A Remote Sensing Perspective**. Prentice-Hall. New Jersey, 1986. 379 p.
- 37 KARARA, H. M. An Introduction to Non-Topographic Photogrammetry. In: Karara, H. M. (ed). **Non-Topographic Photogrammetry**. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Cap. I, p. 1 - 6. 1989.

- 38 KNOBLOCH, Martin ; ROSENTHAL, Torsten. MIROS : A New Software for Rollei Rs1 Digital Monocomparator. In : XVII Congress of ISPRS, Commission V (17 : Washington-DC : 1992). **Anais**. Washington-DC : ISPRS,1992.
- 39 LILLESAND, Thomas M. e KIEFER, Ralph W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley & Sons. New York, 1987. 721 p.
- 40 LUGNANI, João Bosco. **Introdução à Fototriangulação**. Curitiba : UFPR, 1987. 134 p.
- 41 MIGUEZ, Luiz Alberto Lopez e TOURINHO, Mauricio Buch. Levantamento Fotogramétrico Terrestre de Fachadas. **Revista Brasileira de Cartografia**. N. 4, Outubro de 1991. p (62 - 65).
- 42 MIKHAIL, Edward M. Introduction to Metrology Concepts. In: Karara, H. M. (ed). **Non-Topographic Photogrammetry**. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Cap. II, p. 7 - 14. 1989.
- 43 MITISHITA, Edson Aparecido. **Monorestituição digital de aerofotos, associada com sistema de computação gráfica CAD, para fins de mapeamento na área florestal**. Tese de Doutorado em Ciências Florestais. UFPR, 1993. 151 p.
- 44 McGLONE, J. Chris. Analytic Data-Reduction Schemes in Non-Topographic Photogrammetry. In: Karara, H. M. (ed). **Non-Topographic Photogrammetry**. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Cap. IV, p. 37 - 57. 1989.
- 45 MENDONÇA, Francisco Jaime Bezerra. Fotogrametria Digital no Levantamento do Patrimônio Cultural Edificado - Retificação. In : Congresso Brasileiro de Cartografia (17.: 1995 : Salvador). **Anais...** Salvador : SBC, 1995.
- 46 MÜFTÜOĞLU, Oguz ; ÖRMECI, Cankut. A System for the Normal Case of Close-Range Photography with Terrestrial Camera. In : XVII Congress of ISPRS, Commission V (17 : Washington-DC : 1992). **Anais**. Washington-DC : ISPRS,1992.

- 47 NAFTEL, A. J. e BOOT, J. C. An Iterative Linear Transformation Algorithm for Solution of the Collinearity Equations. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. LVII (7), July, 1991. p(913 - 919).
- 48 NIBLACK, Wayne. **An Introduction to Digital Image Processing**. Prentice-Hall International, Englewood Cliffs. 1986.
- 49 NOVAK, Kurt. Retification od Digital Imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. LVIII (3), March, 1992. p(339 - 344).
- 50 NOVO, Evlyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento Remoto : Princípios e Aplicações**. Editora Edgard Blücher LTDA. São Paulo, 1992. 308 p.
- 51 OGLEBY, Clifford L. Advances in the Digital Recording of Cultural Monuments. **ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing**. 50 (3), March, 1995. p(8 - 19).
- 52 OLIVAS, Mary Angélica de Azevedo. **Calibração de Câmaras Fotogramétrica. Aplicação dos Métodos : Câmara Convergente e Campo Mistos**. Tese de Mestrado em Ciências Geodésicas. UFPR, 1980. 98 p.
- 53 PALLASKE, Rainer; MARTEN, Werner ; MAUELSHAGEN, Landolf. Digital Orthophoto-System for Architecture Representation. In : XVII Congress of ISPRS, Commission V (17 : Washington-DC : 1992). **Anais**. Washington-DC : ISPRS,1992.
- 54 PATIAS, Petros e ROSSIKOPOULOS, Dimitrios. SNAP : A System For Non-Metric Architectural Photogrammetry. In : XVII Congress of ISPRS, Commission V (17 : Washington-DC : 1992). **Anais**. Washington-DC : ISPRS,1992.
- 55 PHILIPS, Jürgen. A Restituição Digital para Fins de Documentação Geométrica de Monumentos e Objetos Industriais. In : Congresso Brasileiro de Cartografia (17.: 1995 : Salvador). **Anais...** Salvador : SBC, 1995.

- 56 RUBENKINGL, Neil J. **Programação em Delphi : para leigos**. São Paulo: Berkeley., 1995. 372 p.
- 57 SABINS, Floyd F. Jr. **Remote Sensing : Principles and Interpretation**. W. H. Freeman and Company. New York, 1986. 449 p.
- 58 SALLEM FILHO, Silas. Ortofotocarta Digital. **XVII Congresso Brasileiro de Cartografia**. Salvador - Ba, 30 de julho a 4 de agosto, 1995. p (337 - 343).
- 59 SILVA, Daniel Carneiro da e DALMOLIN, Quintino. Levantamento de Um tanque Utilizando Fotogrametria a Curta Distância. In : Congresso Brasileiro de Cartografia (17.: 1995 : Salvador). **Anais...** Salvador : SBC, 1995.
- 60 SILVA, Daniel Carneiro da. **Cosiderações Práticas em Fotogrametria a Curta Distância Aplicada ao Levantamento de um Tanque e a Questão da Precisão e Exatidão**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR. Curitiba. 1995.
- 61 SCHOWENGERDT, Robert A. **Tecchniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing**. Academic Press, INC. New York, 1983. 249 p.
- 62 STREILEIN, André; BEYER, Horst ; KERSTEN, Thomas. Digital Photogrammetry Techniques for Architectural Desing. In : XVII Congress of ISPRS, Commission V (17 : Washington-DC : 1992). **Anais**. Washington-DC : ISPRS,1992.
- 63 VILELA, Júlio C. M. e AGUIRRE, Argentino J. Avaliação de Distâncias e Áreas Calculadas com Coordenadas Transformadas de Aerofotogramas Digitalizados. In : Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico(2.: 1996 : Florianópolis). **Anais...** Florianópolis: 1995.

- 64 WALDHÄUSL, P. Defining the Future of Architectural Photogrammetry. In : XVII Congress of ISPRS, Commission V (17 : Washington-DC : 1992). **Anais.** Washington-DC : ISPRS,1992.
- 65 WARNER, Scott L. e GOLDSMAN, Paul. **Delphi 2 em Exemplos.** São Paulo: MAKRON Books., 1996. 551 p.



## AGRADECIMENTOS

O autor externa seus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas e instituições :

- Ao Prof. Dr. Quintino Dalmolin, da UFPR, pelo apoio e orientação indispensáveis ao desenvolvimento desta dissertação;
- Aos Professores Carlos Antonio Oliveira Vieira, do Departamento de Engenharia Civil da UFV e Vladimir Oliveira Di Iorio, do Departamento de Informática da UFV, pelo apoio e co-orientação indispensáveis ao desenvolvimento desta dissertação;
- Ao Professores Ricardo Seixas Brites, Carlos Antônio Álvares Ribeiro e Vicente Paulo Soares do Departamento de Engenharia Florestal da UFV, pelo acompanhamento e sugestões;
- Aos amigos e acadêmicos Wanderley, André, Marcos, Vagner, Dalva e Delson que participaram em várias etapas deste processo;
- Ao CNPq , pela bolsa de estudos concedida durante o período de realização do curso;
- Ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFV, na figura do Prof. Paulo Tadeu Arantes, que incentivou e acompanhou todo o processo;
- A todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>xvi</b>
<b>LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS .....</b>	<b>xvii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xix</b>
<b>1.0 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2 A PROPOSTA DO TRABALHO .....	2
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	2
<b>2.0 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
2.1 PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS .....	3
2.1.1 Técnicas de pré-processamento .....	5
2.1.1.1 <i>Correção Radiométrica</i> .....	6
2.1.1.2 <i>Correção Geométrica</i> .....	8
2.1.2 Técnicas de realce .....	8
2.1.2.1 <i>Manipulação de Contraste</i> .....	8
2.1.2.1.1 Aumento de Contraste Linear .....	10
2.1.2.1.2 Aumento de Contraste Linear Saturado .....	12
2.1.2.1.3 Equalização de Histograma .....	12
2.1.2.1.4 Limiar de Nível de Cinza .....	17
2.1.2.2 <i>Filtragem Espacial</i> .....	18
2.1.2.2.1 Filtros Passa Baixas .....	21
2.1.2.2.2 Filtros Passa Altas .....	24
2.2 FOTOGRAMETRIA TERRESTRE .....	30
2.2.1 Sistemas Fotogramétricos .....	33
2.2.1.1 <i>Aquisição de Dados</i> .....	33

2.2.1.2 <i>Redução de dados</i> .....	35
2.2.2. Problemas na aquisição de dados .....	38
2.2.2.1. <i>Comparadores</i> .....	38
2.2.2.2 <i>Deformação da imagem</i> .....	39
2.2.2.2.1. Refração atmosférica .....	40
2.2.2.2.2. Trabalho do Filme .....	40
2.2.2.2.3 Distorções das Lentes .....	41
2.2.3 Técnicas Empregadas na Redução dos Dados em Fotogrametria a Curta Distância .....	49
2.2.3.1 <i>Estereofotogrametria</i> .....	49
2.2.3.2 <i>Fotogrametria Bidimensional</i> .....	49
2.2.3.3 <i>Retificação Simples</i> .....	50
2.2.3.4 <i>Retificação Diferencial</i> .....	50
2.2.3.5 <i>Monorestituição</i> .....	51
2.3 - MÉTODOS PARA RETIFICAÇÃO DIGITAL E MONORESTITUIÇÃO .....	53
2.3.1 Método direto .....	54
2.3.2 Método indireto .....	55
2.3.3 Reamostragem ou interpolação de tom de cinza .....	56
2.3.4 Transformações geométricas .....	60
2.3.4.1 <i>Transformação Afim no Plano</i> .....	61
2.3.4.2 <i>Transformação Projetiva no Plano</i> .....	62
2.3.4.3 <i>Equação de Colinearidade Parametrizada</i> .....	63
2.3.4.4 <i>Equação da DLT</i> .....	65
2.3.5 Cálculo dos parâmetros pelo MMQ .....	68
2.3.5.1 <i>Transformação afim</i> .....	73
2.3.5.2 <i>Equação de colinearidade</i> .....	76
2.3.5.3 <i>Equação da DLT</i> .....	81
2.3.5.4 <i>Equação projetiva</i> .....	82
2.3.6 Análise da precisão .....	84
2.3.7 Determinação da grade regular da ortoimagem .....	86
2.3.8 Mapeamento inverso para as equações implementadas .....	89
<b>3.0 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>93</b>

3.1 MATERIAIS EMPREGADOS.....	93
3.1.1 Imagem hipotética .....	93
3.1.2 Fotografias.....	94
3.1.2.1 <i>Preparo do controle</i> .....	94
3.1.2.1.1 Confeção dos Alvos.....	95
3.1.2.1.2 Levantamentos dos Pontos .....	96
3.1.2.1.3 Tomada das Fotografias .....	99
3.2 METODOLOGIA .....	100
3.2.1 Entrada de dados.....	101
3.2.2 Coleta de pontos .....	101
3.2.3 Cálculo dos parâmetros das equações implementadas .....	101
3.2.4 Informações sobre o ajustamento .....	102
3.2.5 Retificação.....	102
3.2.6 Extração das feições .....	108
3.2.7 Exportação dxf.....	112
3.3 DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO PROPOSTO.....	114
3.3.1 Entrada de dados.....	115
3.3.2 Manipulação dos dados.....	118
3.3.2.1 <i>Pré-Processamento</i> .....	118
3.3.2.2 <i>Processamento</i> .....	124
3.3.2.2.1 Execução da Retificação no SIFAR 1.0 .....	125
3.3.2.2.2 Retirada de feição no SIFAR 1.0 .....	131
3.3.3 Saída dos dados .....	136
<b>4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>142</b>
4.1 AVALIAÇÃO DA PRECISÃO .....	142
4.2 AVALIAÇÃO DA IMAGEM HIPOTÉTICA.....	147
4.3 AVALIAÇÃO DAS FOTOS SELECIONADAS .....	153
4.3.1 Avaliação da foto 1 .....	154
4.3.2 Avaliação da foto 2.....	157
4.3.3 Avaliação da foto 3 .....	161
4.3.4 Avaliação da foto 4.....	164
4.3.5 Avaliação da foto 5.....	168

4.4 GERAÇÃO DE ARQUIVO DXF DAS FEIÇÕES RETIRADAS .....	172
4.5 AVALIAÇÃO DA RETIFICAÇÃO .....	173
4.5.1 Avaliação da imagem hipotética .....	174
4.5.2 Avaliação da foto 5 .....	177
<b>5.0 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>181</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	181
5.2 CONCLUSÕES.....	181
5.3 RECOMENDAÇÕES.....	183
<b>ANEXOS 1 - ARQUIVO TIPO AUX.....</b>	<b>185</b>
<b>ANEXOS 2 - ARQUIVO TIPO PRJ .....</b>	<b>186</b>
<b>ANEXOS 3 - IMAGENS UTILIZADAS .....</b>	<b>188</b>
<b>ANEXOS 4 - COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO.....</b>	<b>191</b>
<b>ANEXOS 5 – DADOS PARA AVALIAÇÃO DA IMAGEM HIPOTÉTICA.....</b>	<b>192</b>
<b>ANEXOS 6 – DADOS PARA AVALIAÇÃO DA FOTO 1.....</b>	<b>196</b>
<b>ANEXOS 7– DADOS PARA AVALIAÇÃO DA FOTO 2.....</b>	<b>198</b>
<b>ANEXOS 8– DADOS PARA AVALIAÇÃO DA FOTO 3.....</b>	<b>200</b>
<b>ANEXOS 9– DADOS PARA AVALIAÇÃO DA FOTO 4.....</b>	<b>202</b>
<b>ANEXOS 10– DADOS PARA AVALIAÇÃO DA FOTO 5.....</b>	<b>204</b>
<b>ANEXOS 11– ARQUIVO DXF DAS ENTIDADES EXTRAIDAS.....</b>	<b>206</b>
<b>ANEXOS 12– DADOS DA IMAGEM HIPOTÉTICA .....</b>	<b>207</b>
<b>ANEXOS 13– RELATÓRIO DO SIFAR1.0 .....</b>	<b>208</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>216</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 : Correção radiométrica dos dados .....	6
FIGURA 2 : Representação gráfica da função de transferência.....	10
FIGURA 3 : Representação gráfica de uma reta passando por dois pontos .....	11
FIGURA 4 : Aumento de contraste com saturação .....	12
FIGURA 5 : Aumento de contraste por equalização .....	13
FIGURA 6 : Histograma de uma imagem hipotética a ser equalizada .....	14
FIGURA 7 : Histograma da imagem hipotética equalizada.....	17
FIGURA 8 : Uma operação de limiar sobre uma imagem. a) imagem original; b) imagem processada.....	18
FIGURA 9 : Variações de VB ao longo de uma linha de uma imagem (a) sendo expressas por varias componentes senoidais (b) com diferentes amplitudes e frequências. ....	19
FIGURA 10 : Visualização de uma máscara (b) passando sobre uma imagem (a).....	20
FIGURA 11 : um sistema de formação de imagem.....	26
FIGURA 12: Componentes da distorção radial.....	43
FIGURA 13 : Variação da distorção radial em função da distância objeto-câmara. ....	45
FIGURA 14 : Variação da distorção radial em função da variação do ponto dentro do campo de profundidade .....	46
FIGURA 15 : Parâmetros que determinam o valor da distorção descentrada de lentes. ....	47
FIGURA 16 :Princípio de colinearidade. ....	52

FIGURA 17 : Representação do mapeamento entre uma imagem de entrada e saída.....	54
FIGURA 18 : Mapeamento direto. ....	55
FIGURA 19 : Mapeamento indireto. ....	55
FIGURA 20 : Representação do mapeamento indireto. ....	56
FIGURA 21 : (a) quadrilátero (ABCD) no espaço objeto e (b) quadrilátero (A'B'C'D') no espaço imagem.....	88
FIGURA 22 : Mapeamento inverso.....	89
FIGURA 23 : Princípio da produção de ortofoto digital usando o método indireto. ....	91
FIGURA 24 : Imagem gerada para teste.....	93
FIGURA 25 : Representação esquemática dos alvos utilizados.....	95
FIGURA 26 : Obtenção das coordenadas de um ponto por interseção a vante. ....	96
FIGURA 27 : Representação esquemática em planta e elevação dos alvos sobre o prédio levantado. ....	98
FIGURA 28 : Representação esquemática do efeito de perspectiva sobre as fotografias utilizadas.....	100
FIGURA 29 : Passo 1 da retificação digital usando a transformação afim ou projetiva .....	103
FIGURA 30 : Passo 2 da retificação digital usando a transformação afim ou projetiva .....	104
FIGURA 31 : Passo 1 da retificação digital usando a equação de colinearidade.....	104
FIGURA 32 : Passo 2 da retificação digital usando a equação de colinearidade.....	105
FIGURA 33 : Passo 3 da retificação digital usando a equação de colinearidade.....	105
FIGURA 34 : Passo 4 da retificação digital usando a equação de colinearidade.....	106
FIGURA 35 : Passo 3 da retificação digital usando a equação a DLT.....	106

- 56 RUBENKINGL, Neil J. **Programação em Delphi : para leigos**. São Paulo: Berkeley., 1995. 372 p.
- 57 SABINS, Floyd F. Jr. **Remote Sensing : Principles and Interpretation**. W. H. Freeman and Company. New York, 1986. 449 p.
- 58 SALLEM FILHO, Silas. Ortofotocarta Digital. **XVII Congresso Brasileiro de Cartografia**. Salvador - Ba, 30 de julho a 4 de agosto, 1995. p (337 - 343).
- 59 SILVA, Daniel Carneiro da e DALMOLIN, Quintino. Levantamento de Um tanque Utilizando Fotogrametria a Curta Distância. In : Congresso Brasileiro de Cartografia (17.: 1995 : Salvador). **Anais...** Salvador : SBC, 1995.
- 60 SILVA, Daniel Carneiro da. **Cosiderações Práticas em Fotogrametria a Curta Distância Aplicada ao Levantamento de um Tanque e a Questão da Precisão e Exatidão**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR. Curitiba. 1995.
- 61 SCHOWENGERDT, Robert A. **Tecchniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing**. Academic Press, INC. New York, 1983. 249 p.
- 62 STREILEIN, André; BEYER, Horst ; KERSTEN, Thomas. Digital Photogrammetry Techniques for Architectural Desing. In : XVII Congress of ISPRS, Commission V (17 : Washington-DC : 1992). **Anais**. Washington-DC : ISPRS,1992.
- 63 VILELA, Júlio C. M. e AGUIRRE, Argentino J. Avaliação de Distâncias e Áreas Calculadas com Coordenadas Transformadas de Aerofotogramas Digitalizados. In : Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico(2.: 1996 : Florianópolis). **Anais...** Florianópolis: 1995.



- 64 WALDHÄUSL, P. Defining the Future of Architectural Photogrammetry. In : XVII Congress of ISPRS, Commission V (17 : Washington-DC : 1992). **Anais.** Washington-DC : ISPRS,1992.
- 65 WARNER, Scott L. e GOLDSMAN, Paul. **Delphi 2 em Exemplos.** São Paulo: MAKRON Books., 1996. 551 p.